



# **Zjištění velikosti odpružení u pevnostního dvoufázového materiálu**

## **Bakalářská práce**

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Jakub Fibich**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.





## Bachelor thesis

*Study programme:* B2301 – Mechanical Engineering  
*Study branch:* 2301R000 – Mechanical Engineering  
*Author:* **Jakub Fibich**  
*Supervisor:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Fibich**  
Osobní číslo: **S13000048**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Zjištění velikosti odpružení u pevnostního dvoufázového materiálu**  
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**


### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Materiály používané pro stavbu karoserie (hlubokotažné a pevnostní). Mechanismy zpevnění ocelových plechů.
2. Základy technologie ohýbání. Průvodní jevy a možnosti jejich eliminace.
3. Experimentální zjištění velikosti odpružení při ohybu do tvaru "U" a "V" pro zvolený dvoufázový pevnostní materiál DP 500.
4. Vyhodnocení výsledků měření a doporučení pro další výzkum.
5. Závěr.


Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran textu**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- [1] **PTÁČEK, L. et al.** *Nauka o materiálu I.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademickénakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.  
[2] **DAVIES, G.** *Materials for Automobile Bodies.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.  
[3] **HERTZBERG, R.W.** *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials.* 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.  
[4] **ASM HANDBOOK.** *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation.* 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.  
[5] **MELOUN, M., MILITKÝ, J.** *Statistické zpracování experimentálních dat.* 1. vyd. Praha: PLUS s.r.o., 1994. s. 839. ISBN 80-85297-56-6.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## **Anotace:**

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku odpružení dvoufázového materiálu HCT500X+ZE. Teoretická část pojednává o materiálech používaných na stavbu karosérie automobilů s důrazem na využití pevnostních materiálů. Dále pojednává o problematice technologie ohýbání plechů a parametrech ovlivňující velikost odpružení. Experimentální část se zabývá vlivem technologických parametrů na velikost odpružení materiálu DP 500. Pro experiment byly voleny různé poloměry zaoblení ohybníku a různé velikosti kalibrační síly s cílem zjištění závislosti velikosti odpružení na zvolených technologických parametrech.

### **Klíčová slova**

Dvoufázové oceli, ohyb materiálu, odpružení, poloměr ohybu, kalibrační síla.

## **Annotation:**

This bachelor thesis is focused on measurement of suspension of two-phase material HCT500X+ZE. The teoretical part deals about materials for use make of car bodywork with concentration to strenght materials. Then it was focused technology of bending sheet metals and influencing parametres of size of suspension. In the experimental part deals influence of technological parametres to size of suspension in steel DP500. In the experiment was given different radius of flipper and different calibration forces for order to determine the dependence of the size on the selected technological parametres.

### **Key words**

DP steels, bending material, suspension, radius of bending, calibration force

## Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Doc. Ing. Pavlu Solfronkovi Ph.D. a konzultantovi Bc. et. Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. za rady a pomoc při tvorbě mé bakalářské práce, také bych chtěl velmi poděkovat svým rodičům za podporu při mých studiích a v neposlední řadě své přítelkyni Veronice Odvárkové za trpělivost a podporu při mém samotném studiu.

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Oceli pro tvorbu automobilových karoserií .....	2
2.1. Pohledové oceli .....	3
2.1.1. BH (Bake hardening) oceli.....	3
2.2. Pevnostní oceli .....	5
2.2.1. Dvoufázové oceli (DP – Dual-phase .....	6
Feriticko-martenzitické oceli .....	6
2.2.2. TRIP oceli .....	11
2.2.3. TWIP oceli .....	13
2.3. Ohýbání .....	15
2.3.1. Neutrální osa .....	16
2.3.2. Rozložení a míra napětí při ohybu .....	17
2.3.3. Vnitřní pnutí po ohybu .....	18
2.3.4. Změny průřezů vlivem ohybu .....	18
2.3.5. Odpružení po ohybu .....	20
2.3.6. Další defekty vytvořené po ohybu .....	25
3. Experimentální část .....	28
3.1.    Statická zkouška tahem .....	28
3.1.1. Příprava vzorků .....	28
3.1.2. Výsledky měření .....	29
3.2.    Vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení .....	30
3.2.1. Příprava vzorků .....	30
3.2.2. Provedení experimentu .....	31
3.2.3. Výsledky měření .....	32
3.2.4. Vyhodnocení výsledků měření .....	34



3.3.	Vliv velikosti kalibrační síly na velikost odpružení .....	38
3.3.1.	Příprava vzorků.....	38
3.3.2	Provedení experimentu .....	38
3.3.3.	Výsledky měření .....	44
3.3.4.	Vyhodnocení výsledků měření .....	45
4.	Závěr.....	50
5.	Přílohy .....	52
6.	Seznam použité literatury:.....	55

## Seznam použitých symbolů

Význam	Zkratka	Jednotka
Hliník	Al	-
Titan	Ti	-
Niob	Nb	-
Dusík	N	-
Uhlík	C	-
Bór	B	-
Křemík	Si	-
Mangan	Mn	-
Měď	Cu	-
Fosfor	P	-
Chrómov	Cr	-
Molybden	Mo	-
Vanad	V	-
Mez pevnosti	$R_m$	MPa
Mez kluzu	$R_e$	MPa
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2}$	MPa
Homogenní tažnost	$A_g$	%
Celková tažnost	$A_{80\text{ mm}}$	%
Youngův modul	$E$	MPa
Střední def. zpevnění	$n_s$	1
Střední koef. norm. anizotropie	$r_s$	1
Tuhý roztok uhlíku v žel. $\alpha$	$\alpha$	1

Tuhý roztok uhlíku v žel. $\gamma$	$\gamma$	1
Překrystalizační teplota (F+A $\rightarrow$ F)	$A_{c1}$	$^{\circ}\text{C/K}$
Překrystalizační teplota (A $\rightarrow$ F+A)	$A_{c3}$	$^{\circ}\text{C/K}$
Začátek perlitické přeměny	$P_s$	$^{\circ}\text{C/K}$
Konec perlitické přeměny	$P_F$	$^{\circ}\text{C/K}$
Začátek martenzitické přeměny	$M_s$	$^{\circ}\text{C/K}$
Konec martenzitické přeměny	$M_F$	$^{\circ}\text{C/K}$
Ferit	F	-
Austenit	A	-
Feriticko-martenzitická ocel	FM	-
Celková délka polotovaru	L	mm
Délka oblouku	l	mm
Úhel ohybu	$\alpha$	$^{\circ}$
Poloměr neutrální roviny	$\rho/ R_p$	mm
Ohybová síla	$F_o$	N
Ohybový moment	$M_o$	N·mm
Napětí v ohybu	$\sigma_o$	MPa
Smluvní napětí na mezi úměrnosti	$R_u$	MPa
Smluvní napětí na mezi kluzu	$R_e$	MPa
Průřezový modul v ohybu	$W_o$	mm <sup>3</sup>
Součinitel posunutí neutr. osy	x	1
Tloušťka materiálu	t	mm

Šířka materiálu	$b$	mm
Počáteční průřezová plocha	$S_0$	mm <sup>2</sup>
Počáteční měřená délka	$L_0$	mm
Síla	$F$	N
Napětí	$\sigma$	MPa
Poměrné prodloužení	$\varepsilon$	1
Úhel odpružení	$\beta$	°
Velikost odpružení	$K$	1
Požadovaný úhel ohybu	$\alpha_1$	°
Skutečný úhel ohybu	$\alpha_2$	°
Střední hodnota	$\bar{X}$	1
Střední odchylka	$\sigma$	1
Poloha neutrální osy	$O_1$	mm
Osa ohybu	$O_0$	mm
Minimální délka ramene	$l_{min}$	mm

# 1. Úvod

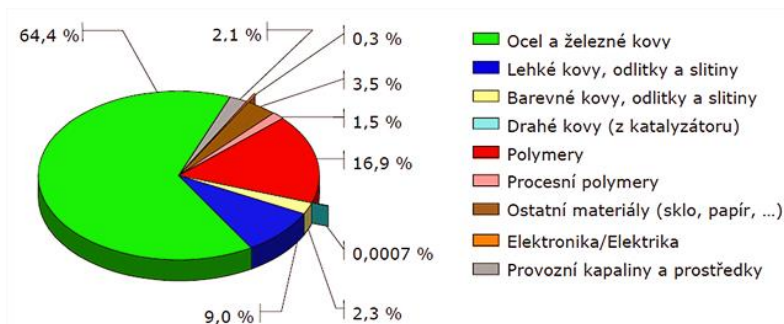
S rostoucí poptávkou po osobních automobilech roste úměrně i poptávka po bezpečnosti skeletu automobilu. Jedním z nejdůležitějších aspektů je vývoj lehčích a pevnějších materiálů, které zaručují lepší bezpečnost posádky vozu, snižují množství použitého materiálu, náklady na výrobu vozu (levná technologie) a ekologické zatížení (snížení hmotnosti = snížení výkonu na získání hybnosti vozu, tedy snížení množství paliva a zatížení okolního ovzduší). Jedním z těchto materiálů právě dvoufázová ocel, která výborně splňuje striktní kritéria automobilového průmyslu. Dvoufázová ocel je hojně používaná do pevnostního skeletu vozu na tvorbu výztuží pro ochranu posádky vozu. Při tvorbě ohýbaných částí je nutné se vypořádat s negativním důsledkem odpružení. V průmyslovém měřítku se jedná o komplexní problém spojenou s tímto procesem. Existují různé eliminační prostředky, výpočty empirického charakteru (málo přesné, levné, časově levné) i numerického charakteru (velice přesné, nákladné, časově náročné), které šetří náklady na výrobu (finanční i personální) a zjednodušují proces.

Práce je v první části stručně zaměřena oceli pro automobilový průmysl, a to přesně pro tvorbu karoserií, jelikož zde je hlavní aplikace, poptávka a hlavně vývoj dvoufázových ocelí, a to pro tvorbu pevnostních struktur v karoserii. Práce se věnuje dvoufázové oceli, přesněji feriticko – martenzitické. Dále je zde rozebráno ohybové tváření s celkovou charakteristikou i s vadami, zejména odpružení materiálu. V závěru teoretické části jsou ukázány výpočty odpružení materiálu pomocí empirických vzorců, ale také i nastínění numerického modelu pro přesný výpočet odpružení.

Experimentální část je zaměřena na stanovení vlivu technologických parametrů na odpružení dvoufázové oceli DP 500. Základní mechanické hodnoty materiálu DP 500 byly stanoveny pomocí statické zkoušky tahem. Velikost odpružení byla stanovena pomocí zkoušky ohýbáním do tvaru „V“. Voleny byly různé technologické parametry: Vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení; Vliv velikosti kalibrační síly na velikost odpružení. Průběh měření bylo uskutečněno 3D měřícím zařízením. Měření spočívalo v zjištění konečného úhlu vzorku. Na základě výsledků měření byly sestaveny grafy velikosti odpružení.

## 2. Oceli pro tvorbu automobilových karoserií

Pro stavbu karoserie automobilu je použito rozmanitého množství materiálu (ocelí, slitin neželezných kovů, polymerů, textilií atd. ...) viz. obr. 1



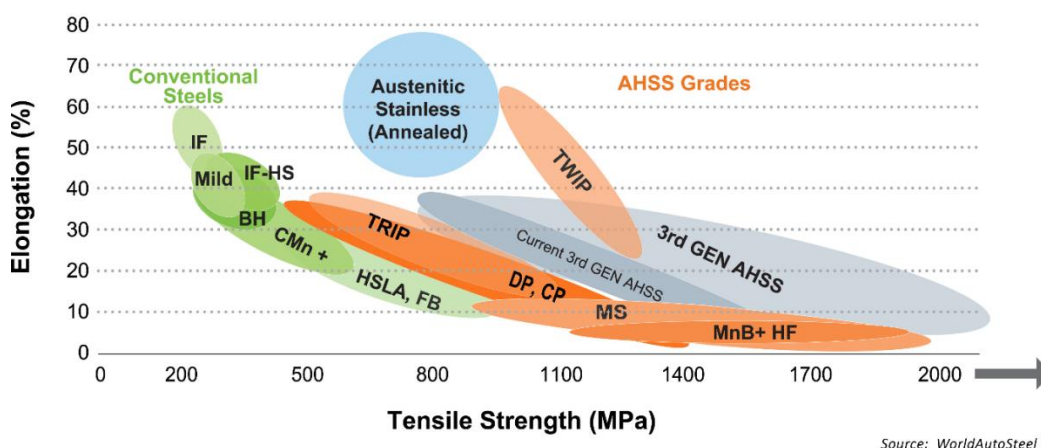
Obrázek 1: materiálového složení vozu Škoda Octavia 1,9 TDI, 74 kW, 5stupňová převodovka, hmotnost 1 363 kg

Zdroj: <https://is.muni.cz/do/ped/kat/fyzika/autem/pics/vyroba-03.png>

Nejdůležitější stavební jednotkou je bezpochyby ocel, která tvoří okolo 65% celkového materiálu na vozidle. Oceli používané pro tvorbu automobilových karoserií lze rozdělit na dvě hlavní skupiny

- A) pohledové oceli
- B) pevnostní oceli

Aplikace jednotlivých druhů ocelí je výsledkem jejich vhodných vlastností pro danou část karosérie viz. obr. 2.



Obrázek 2: Diagram porovnávající oceli používané v automobilovém průmyslu v závislosti tažnosti a pevnosti v tahu

Zdroj: [http://www.worldautosteel.org/wpcontent/uploads/2012/03/AHSSDiagram\\_WorldAutoSteel-copy.png](http://www.worldautosteel.org/wpcontent/uploads/2012/03/AHSSDiagram_WorldAutoSteel-copy.png)

## 2.1. Pohledové oceli

Pohledové oceli se podílí na vnějších a vnitřních částech designu automobilu (vnější kapota, blatníky, zavazadlový prostor, atd. ...). Hlavní použití je pro karosářské výlisky, nejdůležitější vlastností je tudíž výrazná tvárnost. Tyto oceli dále musí splňovat několik důležitých parametrů, jako jsou: odolnost proti degradaci, nízká hmotnost, dobré vlastnosti pro další zpracování (svařitelnost, tvárnost, tažnost, atd. ...), vhodnost k povrchovým úpravám (lakování), recyklovatelnost, tlumení mechanických vibrací a dlouhá životnost. Mají hlavní využití na pohledové části vozu, plechy a podpůrné části automobilu (blatníky,...) atd. ... [1]

Na tyto oceli a části v nich obsažené se nekladou nároky na vysokou pevnost a tuhost. Jsou plně svázány s nosnou částí skeletu, která je tvořena z vysokopevnostních slitin. Také se uplatňují jako podpůrné prvky při pasivní bezpečnosti automobilu (ochrana pro chodce – tvárnější materiály; vyproštění cestujících; riziko zranění účastníků mimo nehodu) [2].

Standardní tloušťka pohledových plechů se pohybuje okolo 0,55 - 0,8 mm podle umístění ve vozidle [1].

Příkladem jsou tzv. Bezintersticiální (IF - Interstitials Free) oceli

### 2.1.1. BH (Bake hardening) oceli

Jedná se o oceli se složením jako refofosforizované IF oceli, u kterých dochází k umělému stárnutí (BH procesu). BH efekt je využit pro zvýšení meze kluzu oceli.

Důležitým faktorem pro BH efekt: vytvrzovací efekt má vysoký podíl volných interstitických atomů C a N v tuhém roztoku (ve feritické matici). Další prvky, které mají vliv na BH efekt jsou Mn, Si, P a hlavně Ti a Nb. Množství Ti a Nb se řídí podle obsahu C a N. Optimální koncentrace rozpuštěného intersticiálního C ve feritické matici je 6 až 8 ppm. Dále je zapotřebí: válcování za tepla → následné rychlé ochlazení → válcování za studena (zvýšení počtu dislokací) → rekrystalizační žhání (dlouhodobé s pomalým náběhem na teplotu nebo krátkodobé s rychlým náběhem na teplotu). K prvnímu zvýšení  $R_e$  dochází deformačním zpevněním (plastická def.). K samotnému BH efektu dochází při teplotě 170°C po dobu 20 min při vypalování laku na karosérii, kde dochází ke druhému zvýšení  $R_e$ . V konečném

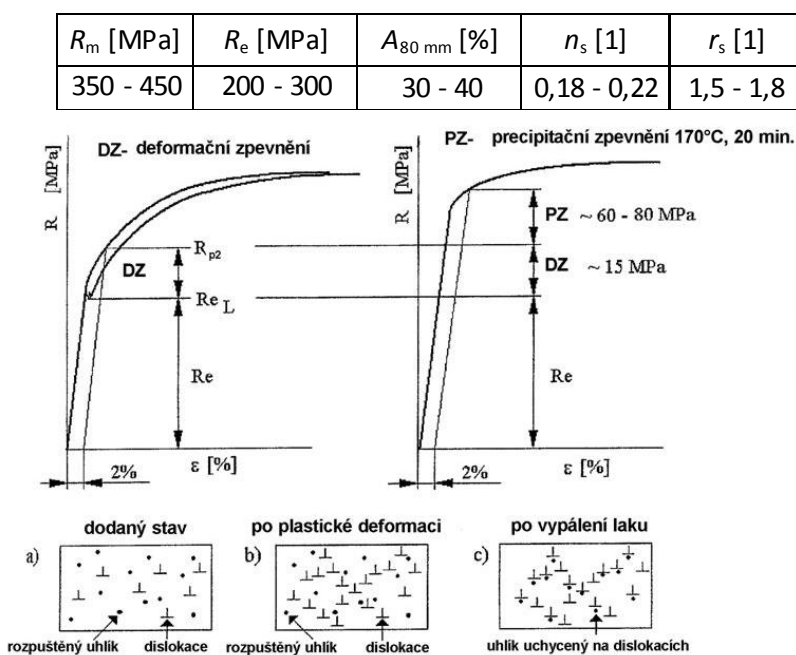
důsledku se  $R_e$  může zvýšit o 40 až 80 MPa (s oběma navýšeními  $R_e$  dojde k navýšení  $R_e$  o cca 40 – 50 % konečné hodnoty) viz obr. 3. Po BH vytvrzení dochází ke snížení plasticity, ale zvyšuje se tuhost karoserie. Tato tuhost karoserie propůjčuje vyšší odolnost vůči deformacím. Výsledné mechanické vlastnosti lze vidět v tab.1.<sup>[3]</sup>  
[4] [5]

Se zvýšeným obsahem Ti nebo Nb, je k dosažení BH efektu nutno zvýšit teplotu nad 170 °C, aby došlo rozpuštění karbonitrických precipitátů. [7]

Tyto oceli se využívají pro úchyty a sloupky dveří a bočnic, nosníků střech, kapot motorů atd. ...

Tabulka 1: Orientační mechanické vlastností ocelí s BH efektem

Zdroj: MACHEK, Václav. *Kovové materiály 3: speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1. Str.: 85



Obrázek 3: Grafické znázornění zvýšení  $R_e$  při BH efektu

Zdroj: [http://images.slideplayer.cz/8/2021068/slides/slide\\_19.jpg](http://images.slideplayer.cz/8/2021068/slides/slide_19.jpg)



## 2.2. Pevnostní oceli

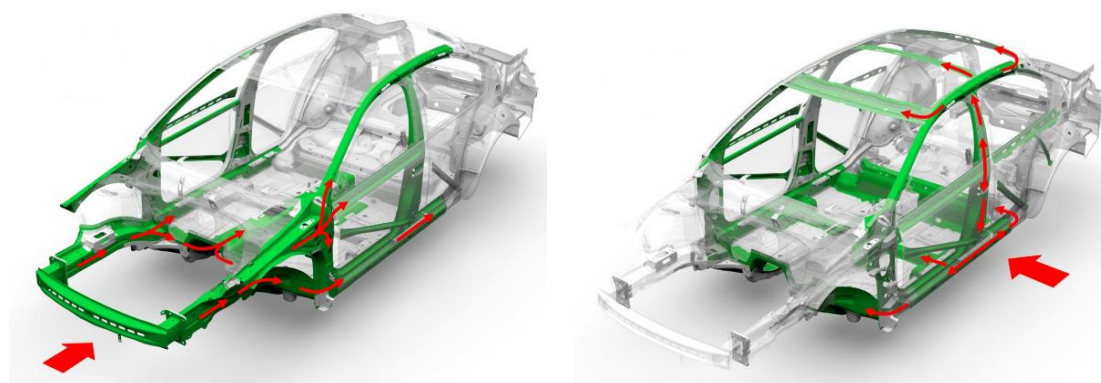
Tyto oceli mají jednu hlavní funkci, a to udržet celistvost skeletu karoserie, kde sedí posádka vozu při dopravní nehodě. Ve skeletu karoserie okolo posádky je použita velká variace pevnostních ocelí, které jsou rozmístěny ve skeletu podle jejich vlastností s ohledem na přenos kinetické, posléze deformační, energie do karosérie (obr. 4). Jsou zde použity: DP oceli, CP oceli, TRIP oceli, TWIP oceli, Borové oceli a MS oceli.

Myšlenka bezpečné konstrukce karoserie je založena na principu rozložení deformační energie a následného přesměrování energie do určitých sloupků a vzpěr (v rizikových oblastech jsou právě použity pevnostní oceli s ohledem na lokální energii) s maximálním ohledem na bezpečnost posádky viz. obr.5 a 6. Trend při dimenzování bezpečného automobilu je obětovat určitou částí vozu (zde je myšleno defoelementy, deformační zóny automobilu), kde se sníží deformační energie a posléze se deformační energie rozprostře do celé karoserie, proto posádka přežije i při nárazu s vysokými energiemi (pro nejčastější nehody: přední a zadní náraz). Mezi nejhorší nehody patří nehody z boční části, kde největší část pohlcené energie přebírá tzv.: B sloupek. Boční nárazy jsou největší slabinou bezpečných karosérií.



Obrázek 4: Vzorky jednotlivých ocelí po CRASH testu

Zdroj: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/mtk/MTK3.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf)



Obrázek 5,6: Rozložení sil působících při čelním nárazu (vlevo); rozložení sil působících při bočním nárazu (vpravo).

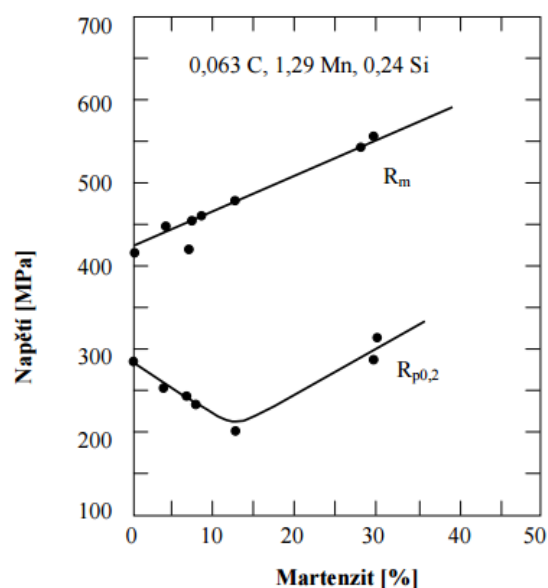
Zdroj: <http://www.bezpecnecesty.cz/cz/bezpecnost-automobilu/pasivni-prvky-bezpecnosti/karoserie>

## 2.2.1. Dvoufázové oceli (DP – Dual-phase)

Jedná se o materiály, které mají dvoufázovou strukturu – v tomto případě se jedná o kompozitní materiály kovového charakteru. Každá z fáze spojuje ve výsledku vlastnost, která propůjčuje materiálu specifické vlastnosti např.: zvýšení meze kluzu, zvýšení tažnosti, korozivzdornost. Mezi nejvýznamnější dvoufázové oceli patří: feriticko-martenzitické, austeniticko-feritické, martenziticko-feritické.

### Feriticko-martenzitické oceli

Tento typ oceli řadíme do skupiny vysoce pevných ocelí pro tváření za studena. Jedná se o vícefázové oceli speciálně vyvinuté pro automobilový průmysl. Struktura je tvořena dvěma fázemi. První fáze je měkká feritická matrice. Tento jemnozrný polygonální ferit je zastoupen v mikrostruktuře 70 – 90 % a propůjčuje oceli dobrou tvářitelnost a plasticitu. Velikost zrna feritu je 3,5 – 7  $\mu\text{m}$  (obr.8). Druhá fáze jsou disperzně rozptýlené ostrůvky martenzitu, který je zastoupen v mikrostruktuře 10 – 30 %, při 20% se zvyšuje vyšší riziko spojování



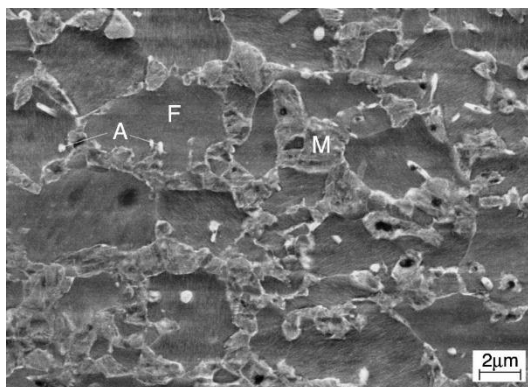
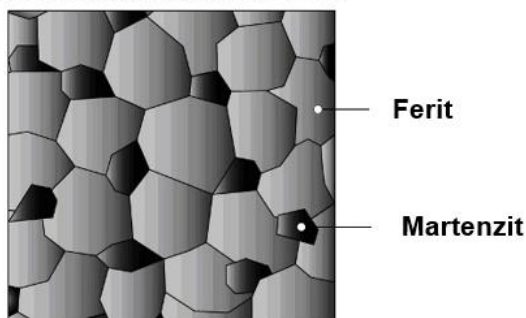
Obrázek 7: Závislost  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  na objemovém podílu martenzitu v FM oceli

Zdroj: [http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_00/papers/241.pdf](http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_00/papers/241.pdf)

martenzitických ostrůvků, které má za následek výrazný pokles plastických vlastností oceli obr. 7. Řádkovitě uspořádaný martenzit propůjčuje pevnostní a houževnaté vlastnosti. Tyto nízkouhlíkové oceli (max. 0,13 % C), ale tento obsah C je i přesto důležitý pro tvorbu martenzitu s dostatečnou pevností. Ve struktuře se v malé míře může vyskytovat také bainit, perlit nebo také zbytkový austenit (obr.9). Tento zbytkový austenit se vyskytuje v ostrůvcích martenzitu a je ve prospěch výsledné oceli, která propůjčuje výborný podíl pevnostně-plastické charakteristiky materiálu. Legující prvky DP ocelí jsou na bázi Mn - Si, kde Mn a Si jsou obsaženy jako substituční prvky. Křemík zvyšuje pevnost oceli bez minimálních negativních účinků na houževnatost a tažnost a způsobuje menší citlivost. Fosfor je sice vhodný pro

zvýšení pevnosti ocelí z důvodu jeho velikosti jako substitučního prvku, ale má nepříjemnou vlastnost, že segreguje na hranicích zrn v teplotních oblastech okolo 500 - 630 °C, kde tato segregace způsobuje zkřehnutí oceli. Je potřeba, aby P byl zastoupen co nejmenším množstvím v oceli. [1] [3] [4] [6] [8]

**Struktura dvoufázové oceli**



Obrázek 8, 9: Ideální strukturní vizualizace DP oceli (vlevo; skutečná struktura dvoufázové oceli – DP 800 (vpravo)

Zdroje: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11245> (vlevo); <http://www.jmrt.com.br/en/the-influence-temperatures-strain-rates/articulo/S2238785414001082/> (vpravo)

Dalšího zpevnění lze dosáhnout pomocí precipitačního legování pomocí V, Cr nebo Mo. Tyto prvky jsou v oceli z důvodu omezení feritické a perlitické transformace. Mo výrazněji zapřičiňuje oddálení počátku ( $P_s$ ) perlitické transformace v řádu z 10 s na 10 000 s, ale na feritickou přeměnu nemá vliv v tomto rozsahu. Mo v rozsahu 0,3 – 0,5% přímo omezuje vznik perlitických ložisek, které jsou nežádané pro výslednou ocel. Cr je významný pro nárůst stability austenitu. Cr je obsažen v rozpětí 0,4 – 0,5%. V je obsažen v podobě stabilního karbidu  $V_4C_3$ . V zvyšuje především tvrdost oceli, jelikož karbidy V mají vysokou tvrdost - okolo 2500 HV. V je obsažen v oceli v množství 0,1%. [4] [6] [8] [9] *“Větší obsah legujících prvků má za následek silné precipitační zpevnění, což způsobuje neúměrný nárůst meze kluzu a snížení tažnosti.”* [6]

Důležitou složkou je také Al, který má vliv na deoxidaci oceli. Množství Al v DP ocelích je v minimální koncentraci 0,02%. [6]

Tyto oceli mají schopnost BH efektu, děje se tak u vypalování laku [3]. *“Vysoká hodnota BH u DP ocelí (až 100 MPa) je dána jednak existencí pohyblivých dislokací kolem disperzně rozptýleného martenzitu a dále vysokým podílem obsahu C a N v tuhém roztoku, v důsledku rychlého ochlazení po plynulém žhání na teplotu kolem 150 °C.”* [4]

## **Výroba DP oceli je dvojího typu:**

- a) Metoda interkritického žíhání
- b) Metoda “as rolled“

### **a) Metoda interkritického žíhání**

Tato metoda je nejvíce uplatňována pro výrobu FM ocelí. Tato metoda tváření je doprovázena dvěma způsoby válcování za tepla a za studena. U metody interkritického žíhání je nutné dosáhnout teploty mezi  $A_{c1}$  –  $A_{c3}$  válcované oceli. U válcování za tepla je nutné dosáhnout požadovaného rozsahu teploty, a poté je ocel nadkritickou rychlostí ochlazená, a to podle požadovaných koncentrací složek feritu a martenzitu v oceli, od kterých se odvíjí výsledné vlastnosti oceli. Dosažení požadovaného rozmezí teplot zapříčiní rovnováhu fází  $\alpha$  a  $\gamma$  a válcování zapříčiní homogenní vlastnosti po celém materiálu. U interkritického žíhání a válcování zastudena dochází k ohřevu materiálu na požadovaný rozsah teplot do oblasti fází  $\alpha$  a  $\gamma$ , kde dochází k rekrytalizaci (u teploty nad  $700^{\circ}\text{C}$  je vysoká rychlost rekrytalizace). U teploty  $A_{c1}$  dochází k rozpadu perlitické struktury a počínající přeměně feritu na austenit, se zvyšující se teplotou směrem k teplotě  $A_{c3}$  roste i koncentrace austenitu. S teplotou  $A_{c3}$  se skládá pouze z fáze  $\gamma$ . [3] [8]

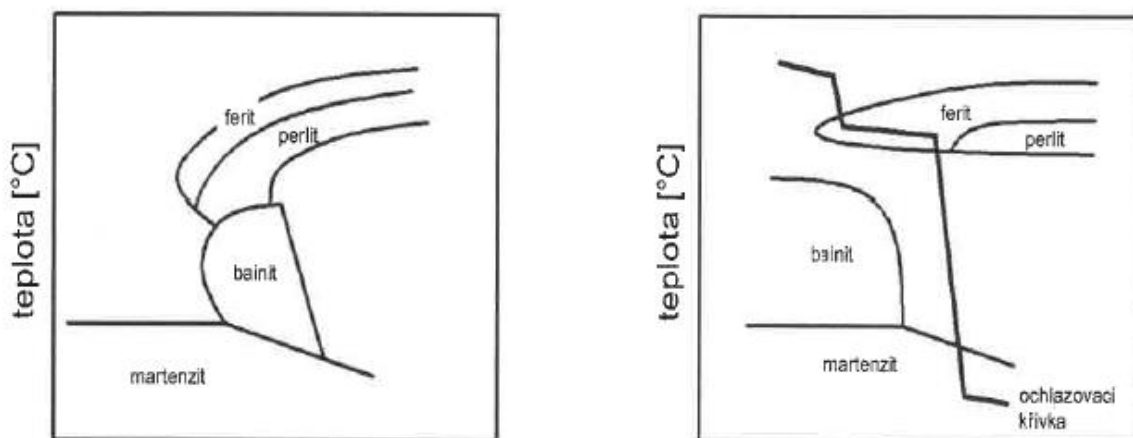
Poznámka: teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  nejsou jednoznačné, záleží na chemickém složení oceli

### **b) Metoda “as rolled“**

U této metody jsou nezbytné čtyři technologické požadavky.

- Prodloužení křivky feritu v diagramu anizotropního rozpadu austenitu (toho docílíme snížením obsahu C v oceli na nejnižší mez)  
U této metody je to okolo 0,04 – 0,08%, to nám zapříčiní požadované množství polygonálního feritu.
- Oddálení perlitické přeměny a zvýšení meze  $P_F$

Tohoto oddálení lze docílit pomocí přidání Mo do oceli, který způsobí oddálení o  $10^3$  násobku času, než kdyby nebyl zastoupen v oceli (obr.10 a 11). Tato technologická úprava je důležitá pro nechtěné tvorby perlitu, který by mohl vznikat při navíjení ocelových pásů.

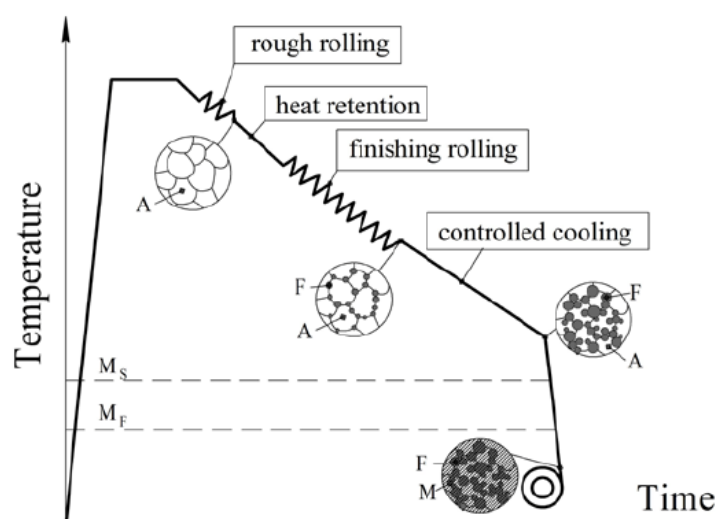


Obrázek 10,11: ARA diagram DP oceli bez Mo (vlevo); ARA diagram DP oceli s Mo (vpravo)

Zdroje: MACHEK, Václav. *Kovové materiály 3: speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1. Str. 88

- Navýšení stálosti netransformovaného austenitu

V ARA diagramu se to projeví nespojitostí feritické a perlitické oblasti s bainitickou. Vytvoří se teplotní odstup v rozmezí okolo 70 - 100°C, kde se navíjejí ocelové pásy a “obejde se” oblast bainitické přeměny. Ve struktuře je stále v malé míře netransformovaný austenit při navíjení pásů (při teplotě okolo 150°C), tyto pásy se posléze ochladí na  $M_s$ , kde se přetransformuje na martenzická ložiska (obr.12).

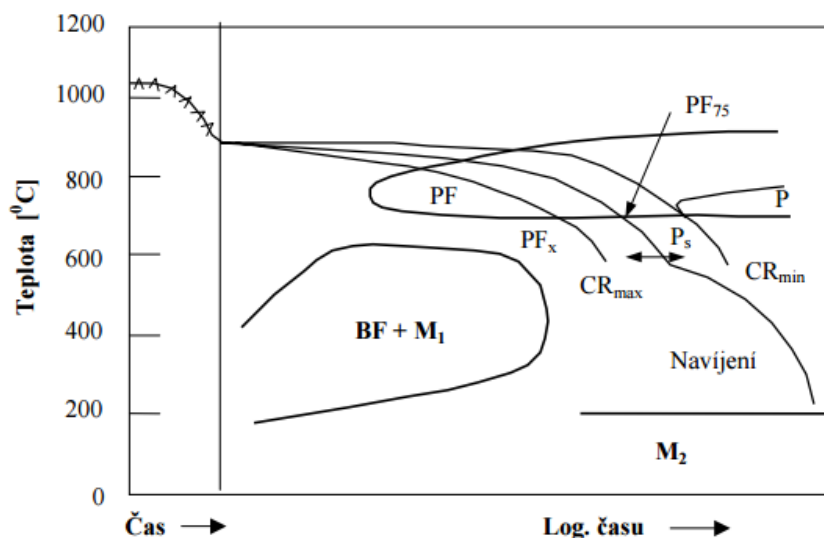


Obrázek 12: Změna struktury po celé době procesu výroby

Zdroje: [https://www.researchgate.net/figure/282845941\\_fig1\\_Figure-1-The-hot-rolled-DP-steels-production-scheme-A-austenite-F-ferrite-M](https://www.researchgate.net/figure/282845941_fig1_Figure-1-The-hot-rolled-DP-steels-production-scheme-A-austenite-F-ferrite-M)

Tohoto rozmezí mezi oblastmi feritické a perlitické přeměny s oblastí bainitickou, lze opět docílit pomocí Mo v rozsahu 0,3 - 0,4 %. Nejvhodnějším prvkem pro stabilizaci netrasformovaného A je Cr v množství 0,4 - 0,5% (obr.13).





Obrázek 13: Maximální ( $Cr_{max}$ ) a minimální ( $Cr_{min}$ ) rozmezí obsahu chromu v ARA diagramu.

Zdroje: [http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_00/papers/241.pdf](http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_00/papers/241.pdf)

- Bránění vzniku nukleace bainitu

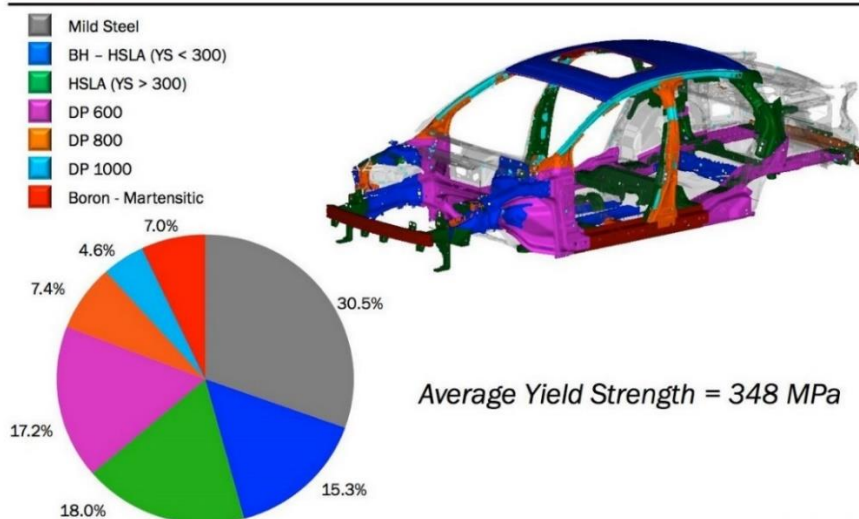
Bránění vzniku nukleace bainitu přímo souvisí s třetím technologickým požadavkem. Zvýšení stability netransformovaného austenitu a zabránění vzniku bainitu lze dosáhnout dvěma způsoby. Buď zvýšením obsahu C v soustavě (nárůst prokalitelnosti), což v našem případě není vhodné (z důvodu 1. technologického požadavku) nebo správnou kombinací obsažených prvků Mn, Si, Cr a Mo. [3] [8]

Tyto oceli našly uplatnění především v automobilovém průmyslu, a to kvůli pevnosti a tažnosti. Díky své mechanické stabilitě při vysokých rychlostech deformace se výborně hodí na tvorbu pevnostního skeletu karoserie (prostor posádky). Za tyto vlastnosti vděčí kombinaci pevnosti a houževnatosti. K výborným vlastnostem patří vysoká odolnost vůči cyklickému namáhání, dobrá tvářitelnost zastudena (členité části - tvorba sloupků a výztuh), dobrý poměr plasticity a pevnosti, plynulá mez kluzu (okolo 70 hm. %), dobrá svařitelnost (zejména díky legujícím prvkům) viz. tab.2. Pevnost lze zvýšit deformačním stárnutím. Mezi další přednosti patří zejména tzv.: BH efekt, který zvýší mez kluzu a pevnost oceli. BH efekt je využit při finálním dokončování - vypalování laku, kdy už není zapotřebí dalšího tváření. [1] [4]

[10]



## Material - BIW



Obrázek 14: Schéma použití DP ocelí v částech karosérie

Zdroje: <http://www.boronextrication.com/2014/03/23/2014-ford-fusion-body-structure/>

Mezi výsledné produkty patří: A, B, C, D sloupky, disky kol, výztuhy střechy, přední a zadní nárazníkové konstrukce, prahy (obr.14) apod. ...<sup>[5] [8] [10]</sup>

Tabulka 2: Ukázka vlastností DP ocelí

[http://www.materialing.com/materialy\\_auto\\_konstrukci/](http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukci/)

$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$n_s$ [1]	$r_m$ [1]
440 – 1180 (výjimečně 1270)	210 – 800 (výjimečně 1150)	< 30	0,19 – 0,25	≈1,0

### 2.2.2. TRIP oceli

Další progresivní vysokopevnostní ocelí jsou TRIP oceli. Užívá se u nich tzv. TRIP (Transformačně Indukovaná Plasticita) efekt, základem je termomechanické zpracování, které se odehrává mezi teplotami A1 a A3 - zde dochází k zjemnění zrna a separaci prvků do dvou fází  $\alpha$  a  $\gamma$ , to vytvoří stabilní zbytkový austenit (stálost  $\gamma_r$  za pokojové teploty), následuje ochlazení, poté je zbytkový austenit plasticky deformován na transformačně indukovaný martenzit, jedná se o destičkovou morfologii. Tato plastická deformace může být uskutečněna v rámci výroby pásů, nebo až na hotovém výrobku, kdy např.: TRIP ocel obsažená ve výztužích, ve kterých dojde ke kinetickému zatížení s plastickou deformací třeba v rámci nehody, dochází k rozložení deformace do celého objemu součásti rovnoměrně, a tím se zvýší její

celková pevnost (běžně deformace přechází do nejslabšího místa, a to do oblasti krčku v rámci tahu s plastickou deformací). K indukci martenzitu dochází pod teplotou  $M_d$ , nad touto teplotou se deformuje austenit. [1] [3] [4] [11]

TRIP oceli jsou tvořeny 40 – 60% interkritického nebo proeutektoidního (acikulárního) feritu 20 – 40% bainitu a 5 – 20%  $\gamma_r$  (pro TRIP efekt je nutnost okolo 5 -10%). „Stabilita zbytkového austenitu, tj. jeho přítomnost ve struktuře TRIP ocelí za pokojové teploty do doby následné deformace zastudena, je dána obsahem C v austenitických zrnech, tvarem a rozměrem zbytkového austenitu a typem obklopující fáze.“ [3] Původně TRIP oceli využívaly surovin CrNiMn ocelí, nyní se z důvodu finančního hlediska využívá legur C-Si-(Al)-Mn. Za významné legury pro TRIP oceli jsou považovány Si a Al. Si a Al zpomalují vznik cementitu, z důvodu nerozpustnosti v něm, což zapříčiňuje vyšší příjem do  $\gamma_r$ , čímž se stává stabilnější. Dále zvyšují bainitickou a feritickou přeměnu. Sám Al zvyšuje teplotu  $M_s$  a váže se na něj P, který potlačuje cementit a zvyšuje tvrdost tuhého roztoku jako intersticiální prvek. TRIP oceli se dělí na nízkolegované tab. 3 a pevnější vysocelegované tab.4. [1] [3] [4]

Použití je na prahy dveří a B – sloupky, příčné a podélné výztuže [1]

Tabulka 3: Ukázka vlastností TRIP oceli – nízkolegované

Zdroj: [http://www.materialing.com/materials\\_auto\\_konstrukci/](http://www.materialing.com/materials_auto_konstrukci/); MACHEK, Václav. Kovové materiály 3: speciální kovové materiály. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1. Str.: 89

$R_m$ [MPa]	$R_e$ [MPa]	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	C [hm. %]	Al [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	Mn [hm. %]
500 - 1050	390 – 800	20 - 30	0,2	0,5 - 1,5		0,04	0,5 - 2

Tabulka 4: Ukázka vlastností TRIP oceli – vysocelegované

Zdroj: MACHEK, Václav. Kovové materiály 3: speciální kovové materiály. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1. Str.: 91

$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	C [hm. %]	Al [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]
2000	1400	20 - 30	0,1 - 0,3	1 - 2		
Cr [hm. %]	Ni [hm. %]	P [hm. %]				
9 - 13	8 - 9	0,04				



### 2.2.3. TWIP oceli

TWIP oceli jsou progresivní typ vysokopevnostních ocelí. Jejich struktura je zcela tvořena austenitem a legurami. Austenitická matrice je stálá za každé teploty. Označení TWIP (Twinning Induced Plasticity) neboli oceli s dvojčatující indukční plasticitou. *“TWIP ocele jsou výjimečné tím, že mají až dvojnásobně větší schopnost absorpce nárazové energie než jiné vysokopevnostní ocele, kdy se při velké rychlosti deformace (např. při nárazu) deformují, ale zachovávají si svoji tvárnost, čímž se nárazová energie rozloží po celém výztužném prvku.”* [3] Základním principem TWIP ocelí je dvojčatění objemu v austenitických zrnech v důsledku deformačního mechanismu. Po zatížení oceli nedochází k deformaci austenitu, ale ke změně orientace krystalografické struktury z výsledku vytvoření dvojčete. Hranice dvojčat se po zatížení chovají jako hranice zrn, jde o efektivní způsob absorpce energie obr.15. Za vynikající vlastnosti vděčí ocel úplné austenitické matici, ta by ale nebyla možná nebýt nezbytných legur. Zejména o Mn, který zadržuje C v austenitu, tím ho činí stabilnější. Další legury jsou Al, který brání transformaci austenitu na nežádoucí martenzit a také zvyšuje odolnost proti korozi a Si, který navyšuje pevnost tuhého roztoku (tab.5). Je špatně svařitelná z důvodu vysokého obsahu Mn. [1] [3] [12]



Obrázek 15: Zastudena zkroucena tyč z TWIP oceli

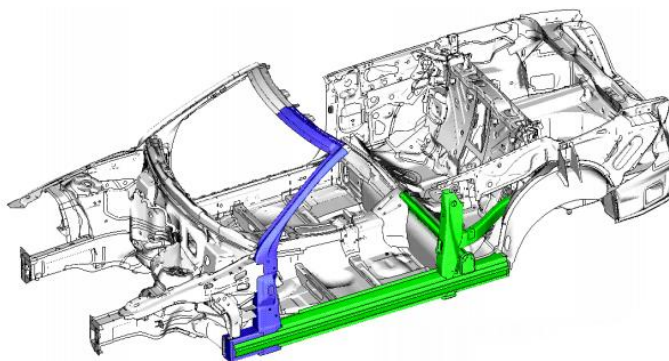
Zdroje: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf)

Použití na tváření zastudena složitých součástí, B – sloupky, boční výztuže a deformační zóny karoserie (obr.16). [1]

Tabulka 5: Ukázka vlastností TWIP oceli

Zdroj: [http://www.materialing.com/materialy\\_auto\\_konstrukcii](http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii)

$R_m$ [MPa]	$R_e$ [MPa]	$n_s$ [%]	$A$ [%]	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Al [hm. %]	Si [hm. %]
580 - 1470	280 - 1350	0,4	15 - 125	0,5 - 0,7	17 - 24	9	3



Obrázek 16: Použití TWIP oceli v karosérii.

Zdroje: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf)

S výrobou karosérií je spojeno technologie ohýbání. Plechy se ohýbají na sloupky, které slouží jako výztuha prostoru pro posádku. Z výrobou výztuží z vysokopevnostních materiálu se pojí v dnešní době technologií tažení nebo kombinací tažení a ohýbání, z důvodu složitosti dílu.

Pro zvýšení pevnosti konstrukce skeletu při zajištění bezpečí posádky se sloupky zpevňují pomocí tvářecího procesu ohýbání. Ohýbají se plechy do různých průřezových tvarů, které mají výsledně vyšší pevnost a tuhost. Tyto výztuže jsou tvářeny do příslušných tvarů, tloušťek plechu a typu materiálu, kterým odpovídá jejich umístění v karosérii dle míry zatížení při autonehodě a prostorového uspořádání. Při využití pevnějších slitin (DP, TRIP atd. ...) a procesu ohýbání se sníží tloušťky plechu, a tím se sníží spotřeba materiálu a paliva bez snížení bezpečnosti vozidla. Ocelové polotovary ve formě pásů pro použití na tvorbu karosérie jsou ohýbány za studena.

## 2.3. Ohýbání

Jedná se o plošnou tvářicí technologii, kde dochází k trvalé deformaci do příslušného úhlu. Při ohybu dochází zákonu zachování objemu, lze jej opětovně rozvinout. Rozvinutou délku (délku výchozího polotovaru) lze stanovit pomocí vztahu:

$$L = \sum_i l_i + \sum_i a_i \quad (2.2.1.)$$

kde: 
$$l = \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \rho \quad (2.2.2.)$$

Výsledná rozvinutá délka je délka neutrální osy. [11] [17] [19]

Průběh ohybu lze rozložit na tři fáze.

### 1. fáze – ohyb při pružné deformaci.

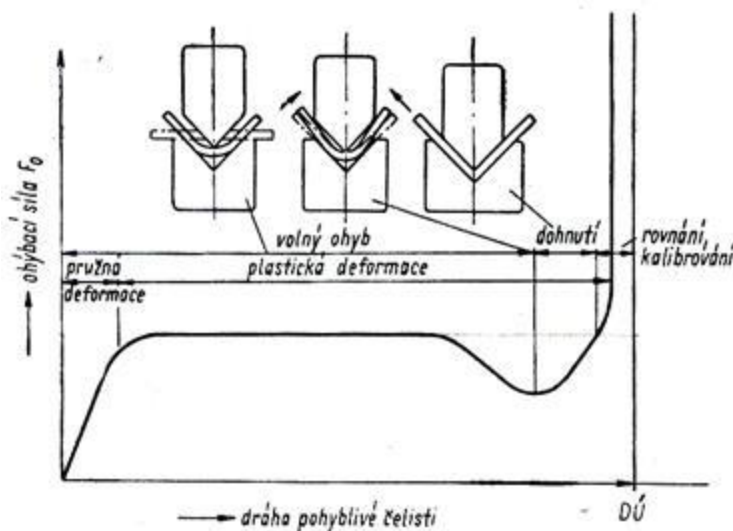
Při elastické deformaci vzrůstá  $F_0$  a  $\sigma_0$ , protože je zapotřebí překonat vnitřní odpor materiálu. Pokračuje-li ohyb dále a materiál překročí mez úměrnosti  $R_u$  dochází k plastické deformaci.

### 2. fáze – ohyb při trvalé deformaci.

Při plastické deformaci zůstává  $F_0$  a  $\sigma_0$  na stabilní úrovni, protože je veškerá energie převedena do deformace materiálu. Na závěr tvářený materiál dosedá na ohybnici a snižuje se  $F_0$ .

### 3. fáze – dohnutí (dotlak)

V této fázi se zvýší  $F_0$ , materiál je dotlačen do ohybnice (úplné dosednutí), kde materiál je dohnut do požadovaného tvaru (obr.17).



Obrázek 17: Průběh lisu v závislosti na  $F_0$  se všemi fázemi ohybu včetně kalibrace

Zdroj:

[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)

V materiálu v rámci ohybu dochází k pružně-plastické deformaci, kde plastická složka deformace uvede materiál do trvalého přetvoření. Při procesu ohýbání je materiál přetvořen pomocí vnějších ohýbacích sil, které působí na materiál ve formě tzv. ohýbacího momentu  $M_0$ . Při ohýbání je na vnitřním poloměru namáhán materiál tlakovým napětím (vlákna se podélně zkracují a příčně roztahují) a na vnějším poloměru ohybu je namáhán tahovým napětím (vlákna se v podélně prodlužují a v příčném směru stlačují). [13] [14] [16]

Proces ohýbání je prováděn tvářením jak za studena, tak i za tepla. Nejběžnější způsob ohýbání je ohýbání za studena, jelikož je energeticky a časově úspornější, nevýhodou je vynaložení vyšších ohýbacích sil. Za tepla se ohýbá, když materiál nebo rozměr nedovoluje ohýbat za studena, jedná se o materiály křehké a pevné, aby se zabránilo vzniku trhlin, prasknutí materiálu např.: tzv. křehkým lomem, nebo kde by muselo být použito velkých ohýbacích sil (pevné materiály, materiály s velkým  $W_0$ ), u součástí, u kterých je velký poloměr ohybu, nebo u kterých nemá dojít k poruše (tenkostěnné trubky). [13]

Nástroj používaný k technologii ohýbání se nazývá ohýbadlo, nejčastěji mají tvar “U” a “V”. Základní součásti ohýbadla jsou ohybník a ohybnice. Ohybník může mít různé tvary dle požadovaného ohybu. Ohybník je převážně částí pohyblivou na ohýbadle. Ohybnice zastává spíše statickou funkci v ohýbadle. [16]

### 2.3.1. Neutrální osa

Mezi těmito vrstvami zatížení se nachází tzv. neutrální osa/vlákno. V této ose je napětí nulové. Tato osa se nenachází v geometrickém středu ohybu, ale je blíže situovaná k vnitřnímu poloměru ohybu. Přibližný poloměr neutrální osy lze vypočítat následujícím vztahem [13] [14] [16] [17]:

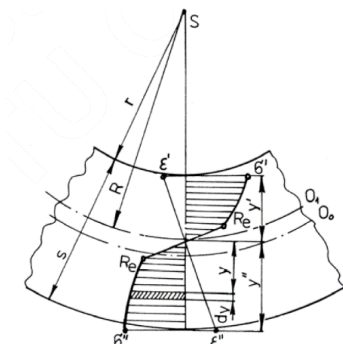
$$\rho = R + x \cdot t \quad (2.2.1.3.)$$

Tabulka 6: Hodnoty součinitele  $x$  posunutí neutrální osy

Zdroj: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)

$\frac{R}{t}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	Nad 5
$x$	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,5

Hodnotu součinitele posunutí lze zjistit z tabulky Tab. 6. Vlákná k vnitřnímu poloměru ohybu jsou stlačována a k vnějšímu poloměru jsou natahována od neutrální osy. Při ohybu se nachází pružná deformace v jádru materiálu se středem v neutrální ose (obr.18). [13] [14] [16] [17]

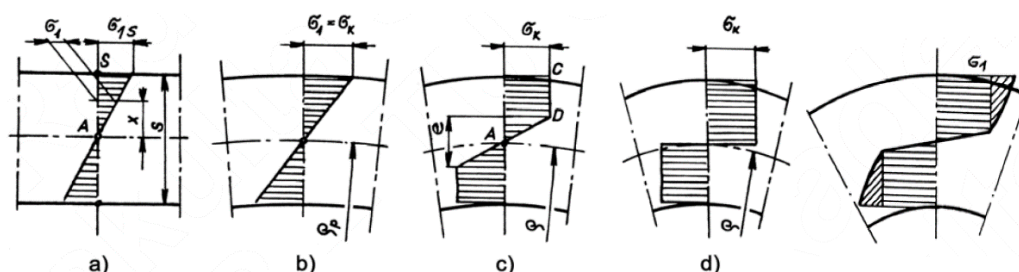


Obrázek 18: Znázornění posunu neutrální osy od osy ohybu. Poloha neutrální osy ( $O_1$ ), mez kluzu ( $R_e$ ), Osa ohybu ( $O_0$ ), tloušťka materiálu ( $s$ ), poloměr ohybu ( $r$ ), poloměr neutrální vrstvy ( $R$ ), napětí tlakové ( $\sigma'$ ), napětí tahové ( $\sigma''$ ), deformace tlaková ( $\epsilon'$ ), deformace tahová ( $\epsilon''$ ), velikost napětí tlakového ( $y'$ ), velikost napětí tahového ( $y''$ )

Zdroj: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>

## 2.3.2. Rozložení a míra napětí při ohybu

Napětí v rámci ohybu se zvyšuje od neutrální roviny směrem ven z materiálu. Na vnitřní straně je napětí tlakové a na vnější tahové. Průběh teoretického napětí se zvyšuje do  $R_e$ . Po přechodu  $R_e$  přechází na stabilní velikosti napětí, na které se drží, které je znázorněno viz. Obr. 19. Ve skutečnosti napětí roste i po přechodu plastickém ohybu jak je znázorněno viz. Obr. 20. [13] [16]



Obrázek 19,20: Teoretické modely ohybu průběh napětí, a) pružný ohyb, b) pružný ohyb s dosažením, c) pružně-plastický ohyb, d) plastický ohyb; Reálný průběh napětí při plastickém ohybu (vpravo)

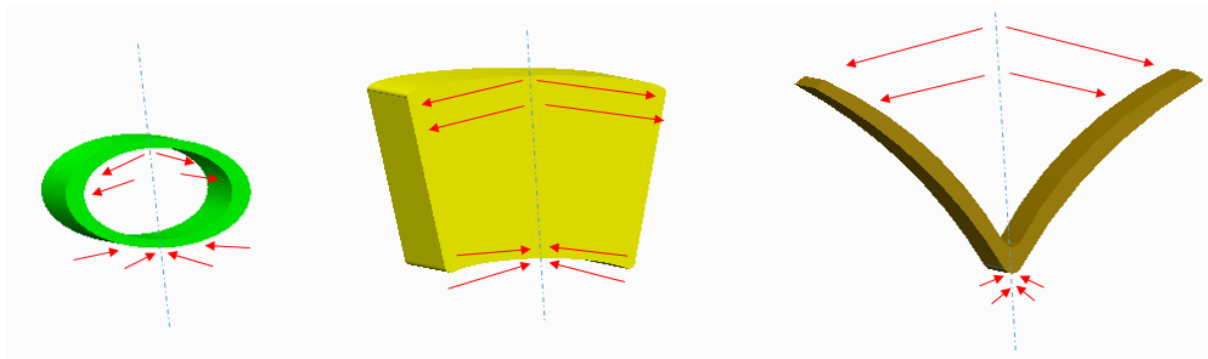
Zdroj: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf> (oba)

### 2.3.3. Vnitřní pnutí po ohybu

Vlákna v jádře materiálu okolo neutrální osy mají tendenci navrátit se do původního tvaru z důvodu zatížení vláken pouze do  $R_e$ , toto jádro obepínají vlákna zatížena nad  $R_e$ , drží tedy výsledný tvar ohybu a do značné míry i pružné jádro, zbylá část se projeví jako odpružení. Po odpružení je snaha navrátit se do původního tvaru, dochází ke stlačování natažených vláken na vnější části ohybu a k natahování stlačených vláken na vnitřní části ohybu. V ohnutém materiálu dochází ke zbytkovému pnutí. [13]

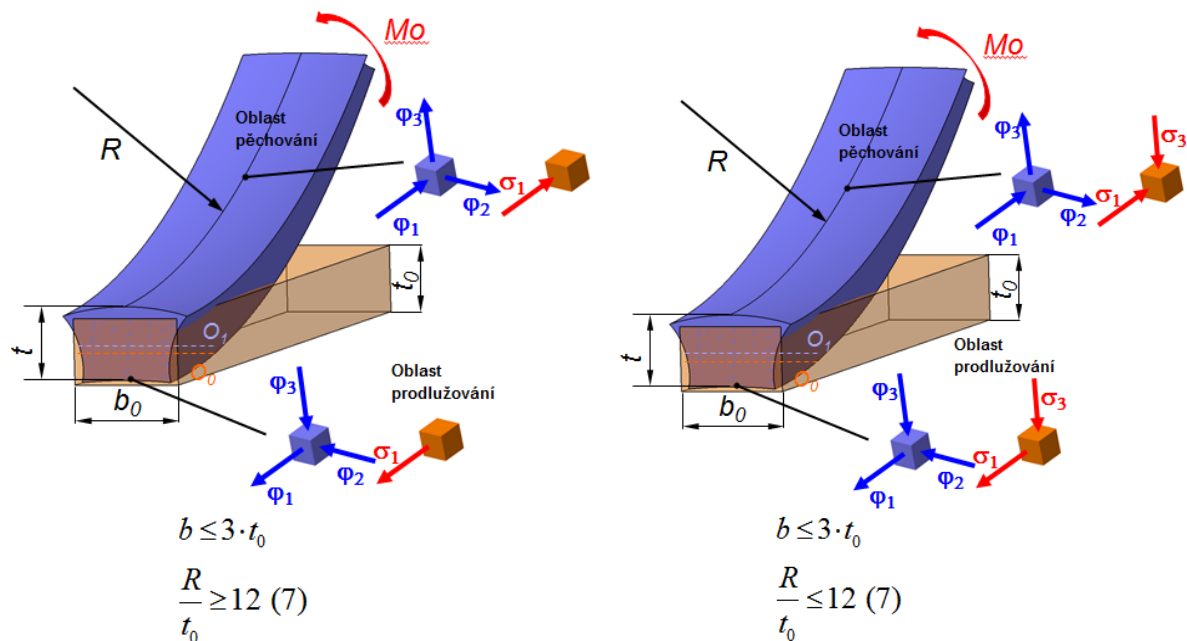
### 2.3.4. Změny průřezů vlivem ohybu

Při ohybu je nutné brát na zřetel také na průřezové vlastnosti polotovaru (obr. 21). Při rozměrech ( $b < 3 \cdot t$ ) dochází ke změně průřezu, vlivem 3osé deformace, kdy na vnitřní straně je materiál natlačen do délky (zkrácení), šířky (zvětšení) a tloušťky (zvětšení) (zapříčinění posuvu neutrální osy), zvětšení je úměrně s mírou všech tří deformací:  $\varphi_1$  - délka,  $\varphi_2$  - šířka a  $\varphi_3$  - tloušťka viz. Obr. 22 a 23. Na vnější straně dochází k přesně opačnému efektu. Ke změně objemu nedochází, platí zde zákon zachování objemu ( $V_0 = V_1$ ). Pokud ale materiál splňuje rozměry ( $b \geq 3 \cdot t$ ), nedochází v materiálu k výrazným změnám, jelikož šíře materiálu brání svým odporem v příčném směru průřezovým změnám. Deformace je rovinná (2osá) a nemění průřez polotovaru, ale dochází ke zvýšení napětí vlivem odporu šíře materiálu (obr.24 a 25). Při ohybu trubek se aplikuje do trubky písek pro zachování kruhového průřezu, při ohybu za tepla je nutností mít písek úplně vysušený, aby nedošlo ke vzniku vodní páry a nárůstu tlaku v trubce. [13] [14] [16]



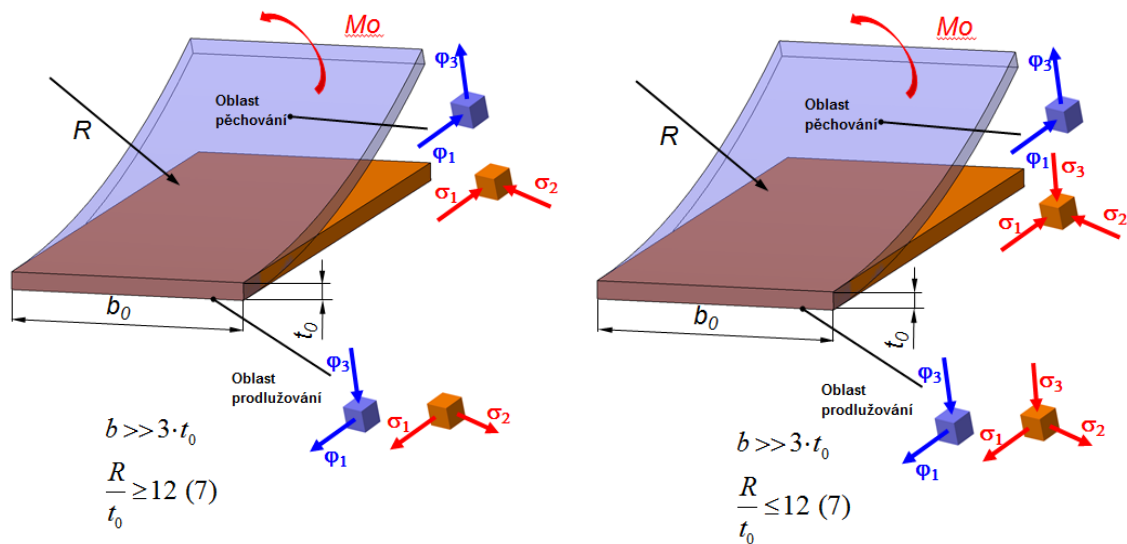
Obrázek 21: Změna průřezu různých ohýbaných segmentů

Zdroj: Vlastní



Obrázek 22,23: Změna průřezu s rozložením napětí a deformací tenké tyče – malý poloměr ohybu (vlevo); Změna průřezu s rozložením napětí a deformací tenké tyče – velkém poloměr ohybu (vpravo)

Zdroj: [www.ksp.tul.cz](http://www.ksp.tul.cz), Technologie ohýbání



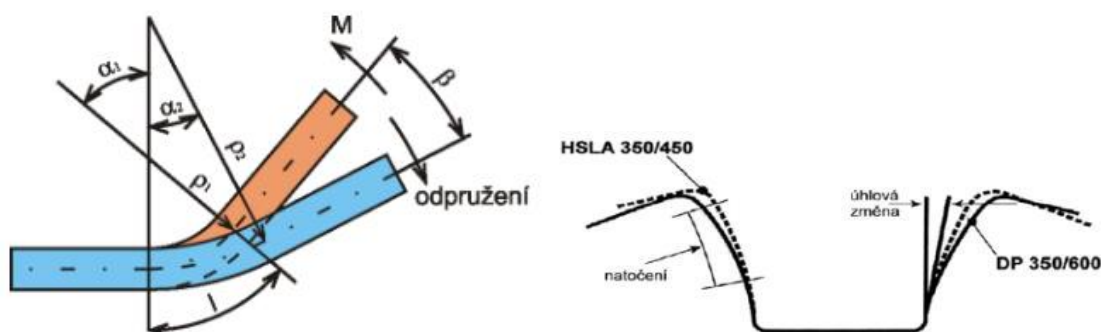
Obrázek 24,25: Změna průřezu s rozložením napětí a deformací široké tyče – malý poloměr ohybu (vlevo); Změna průřezu s rozložením napětí a deformací široké tyče – velkém poloměr ohybu (vpravo)

Zdroj: [www.ksp.tul.cz](http://www.ksp.tul.cz), Technologie ohýbání



### 2.3.5. Odpružení po ohybu

K trvalé změně tvaru plechu je zapotřebí v materiálu překročit  $R_e$ , tedy překročení elastické deformace. Vlákná v jádře materiálu v oblasti okolo neutrální osy zůstávají stále elastická, to způsobí odpružení materiálu o určitou úhlovou odchylku  $\beta$  při dokončení ohybu, ramena tvářené součásti se vrátí o úhel  $\beta$  směrem zpět do původního tvaru (obr. 26). Hlavní vliv na odpružení má modul pružnosti. Odpružení je citelnější se zvyšující se pevností materiálu a se zvětšujícím se poloměrem ohybu (obr.27).



Obrázek 26,27: úhlová odchylka odpružení  $\beta$ , po vyjmutí z ohýbadla (vlevo), srovnání dvou slitin o stejné  $R_e$ , ale jiné  $R_m$  (vpravo)

Zdroje: <http://docplayer.cz/20972929-Urceni-technologie-lisovani-plechoveho-dilu-new-technology-of-forming-metal-sheet-parts.html> (vlevo);

<http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html> (vpravo)

Každý proces tváření za studena má určitou míru odpružení, která je z velké části zanedbatelná, jinak tomu je u ohybu, kde zapříčiňuje na konečný výsledek tvářené součásti. Vlivy na míru odpružení jsou modul pružnosti materiálu, poloměr ohybu, tloušťka materiálu, tvárnost materiálu, délka ramene a konstrukce ohýbadla. Rozsah odpružení závisí na parametrech ohybu. [13] [14] [16] [18]

Velikost odpružení lze empiricky stanovit pomocí vztahu:

$$K = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cong \frac{R_1 + 0,5 \cdot t_0}{R_2 + 0,5 \cdot t_0} [1] \quad (2.2.5.4.)$$

Vložením součinitele  $K$  do vztahů získáme názorné vyjádření úhlové odchylky v empirickém pojetí:



$$\beta_V = \arctg(0,375 \cdot \frac{l \cdot R_e}{k \cdot s \cdot E}) [^\circ] \dots \text{pro ohyb do tvaru "V"} \quad (2.2.5.5.)$$

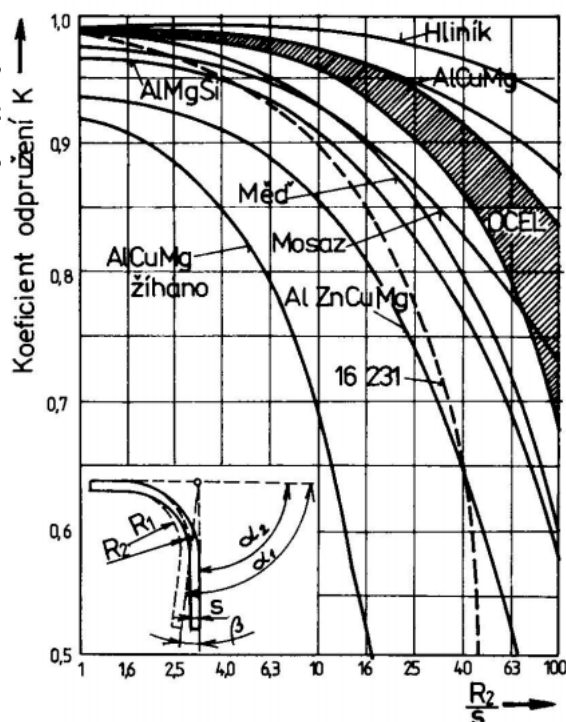
$$\beta_U = \arctg(0,75 \cdot \frac{l_m \cdot R_e}{k \cdot t \cdot E}) [^\circ] \dots \text{pro ohyb do tvaru "U"} \quad (2.2.5.6.)$$

Velikost odpružení lze získat z grafu (obr.28) nebo z tabulky Tab. 7.

Tab. 7: Velikost K pro různé materiály

Zdroj: FISCHER, Ulrich a kol. Základy strojírenství. 2. Haan-Gruiten, Germany: Verlag Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, 2014. ISBN 978-3-8085-1193-0. Str.: 51

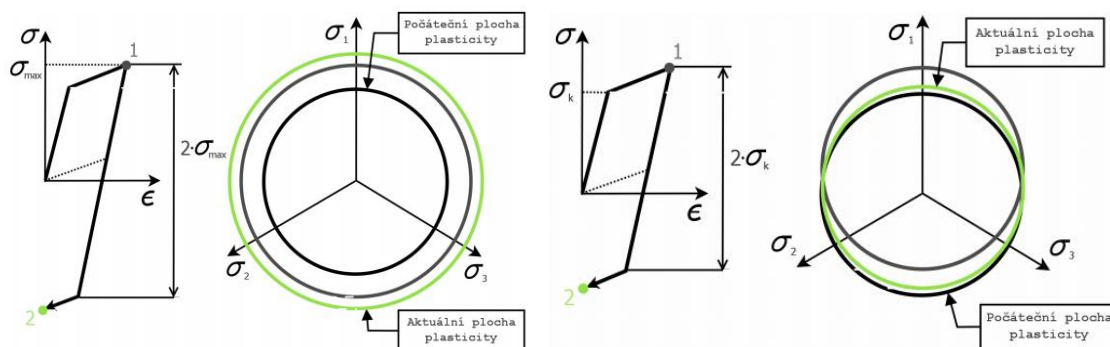
Materiál ohýbaného dílu	poměr $r_2 : s$						
	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16
	koeficient zpětného pružení $k_R$						
S235JRG1	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96
X10CrNi18-8	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,89	0,84
CuZn33	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,89
CuNi18Zn20	-	-	-	0,97	0,96	0,95	0,92
EN AW-Al99,0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97
EN AW-AlCu4Mg1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96
EN AW-AlSi1MgMn	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90



Obrázek 28: Graf znázorňující velikost K, pro různé materiály

Zdroj: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/teorie\\_tvareni\\_\\_navody\\_do\\_cviceni\\_\\_forejt.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/teorie_tvareni__navody_do_cviceni__forejt.pdf)

Automobilový průmysl žádá lehčí a pevnější slitiny na tvorbu karoserií, to vede k vyšší míře odpružení a tedy může vést k nepřesnostem při výrobě. Pro průmyslové a výzkumné měřítka se vypočítává míra odpružení pomocí numerických modelů využívajících do metody konečných prvků, které jsou velmi přesné. Jedním z modelů jsou tzv.: Yoshida-Uemori a Lemaitre – Chaboche. Jedná se o kombinované kinematicko-izotropní modely zpevnění, které snoubí izotropní model zpevnění, kdy materiál má dopředné a zpětné napětí totožné (obr.29), a kinematický model zpevnění, ve kterém je zvýšená četnost plastických deformací udržovaná konstantní velikostí elastické napjatosti (obr.30). Kombinací těchto dvou metod zpevnění lze získat data velmi blízká reálným experimentům (obr.31). [19] [20] [21]

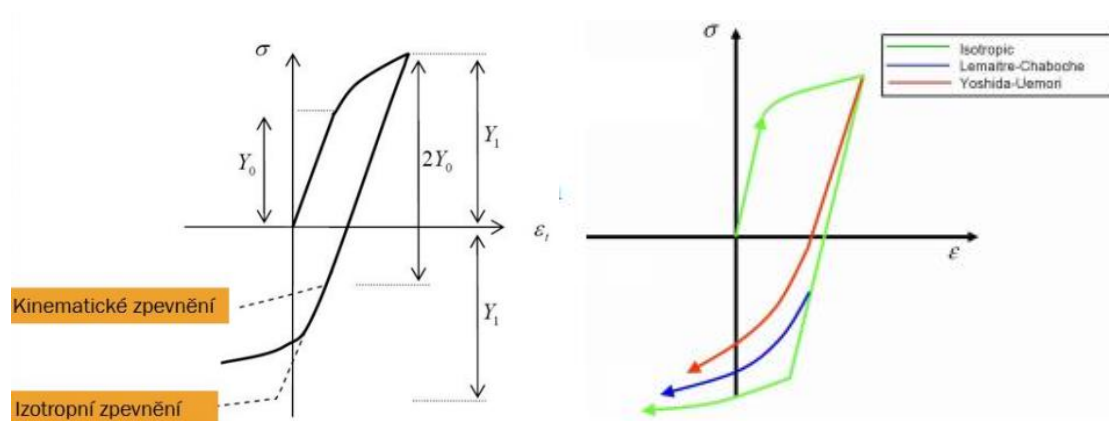


Obrázek 29,30: Plocha plasticity mění svůj průměr, ale se stálým středem vůči rovinám systému (vlevo); plocha plasticity si zachovává svůj průměr, ale mění svoji polohu středu vůči rovinám systému (vpravo)

Zdroj: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29485](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29485)

Jedná se o účinné nástroje pro určení velmi přesného efektu odpružení za pomoci cyklického namáhání materiálu, při kterém se projeví tzv.: Bauschingerův efekt. Jedná se o efekt, kdy je materiál namáhán v jednom směru nad  $R_e$  materiálu, poté je odlehčen a namáhán v opačném směru přes  $R_e$ , opačné napětí je daleko menší než to počáteční. Je to zapříčiněno nerovnoměrností napětích v jednotlivých zrnech krystalů ve struktuře při počátečním napětí, kdy při odlehčení napětí dojde k namáhání méně namáhaných krystalům těmi více namoženými krystaly. V materiálu dojde k vnitřnímu pnutí a toto pnutí sníží míru napětí v opačném směru (dojde k změně  $R_e$  v tahu a tlaku). Tento jev je pozorován u kovů plasticky deformovaných. [22]

Yoshida-Uemori patří k nejpřesnějším a nejpoužívanějším modelům pro popis Bauschingerova jevu (obr.32). Lze ho třeba nalézt v softwarech LsDyna a Pam-Stamp. [12] [15]



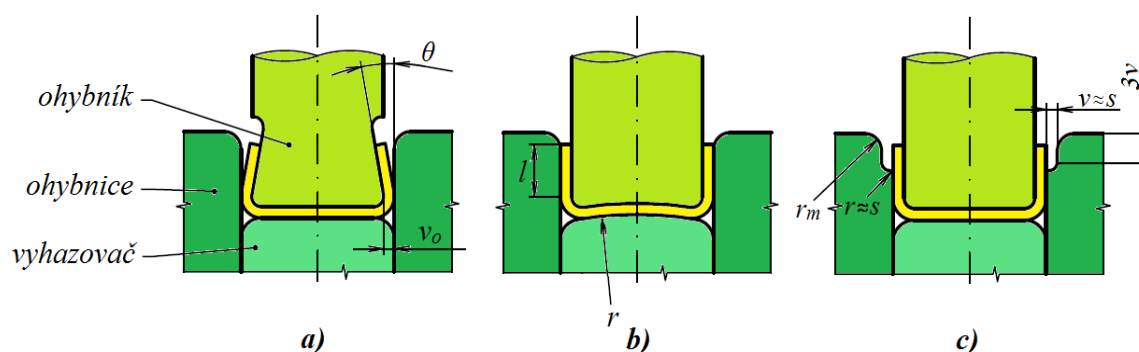
Obrázek 31,32: Změny výsledků při použití kinematického modelu a Izotropního modelu. Plná čára znázorňuje reálný experiment (vlevo); Srovnání modelů Y-U a L-Ch (vpravo).

Zdroje: [http://www.kmp.tul.cz/system/files/1\\_plast\\_uvod.pdf](http://www.kmp.tul.cz/system/files/1_plast_uvod.pdf) (vlevo);

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40270](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40270) (vpravo)

Eliminovat odpružení lze pomocí několika způsobů<sup>[13] [14] [16]</sup>:

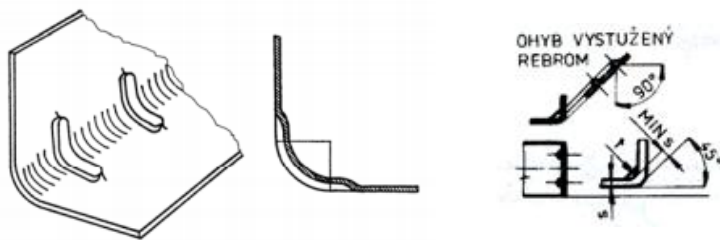
- po fázi dohnutí lze použít čtvrtou fázi kalibrace, kde dochází k nárůstu ohýbací síly, dochází k plastické deformaci v místě ohybu
- ohnutí materiálu o úhlovou odchylku  $\beta$  odpružení na základě výsledků z výpočtů, nebo také zabroušení boku ohybníku o  $\beta$  viz. Obr. 33 a)
- Vyboulením čela ohybníku a negativem vyboulení na přidržovači (obr. 33 b))
- Zabroušením vrchní části ohybnice o tloušťku materiálu s postupným ohýbáním (odlehčení od ohybnice), dochází k postupné eliminaci odpružení (obr. 33 c))



Obrázek 33: a) ubrání materiálu ohybníku o úhel  $\beta$ ; b) vyboulení čela přidržovače; c) ubrání materiálu ohybnice – odlehčení

Zdroj: <http://docplayer.cz/40528719-Vyroba-drzaku-anteny-sdruzenym-nastrojem.html>

- Prolisováním žebra pro vyztužení místa ohybu (obr.34,35 a 36)

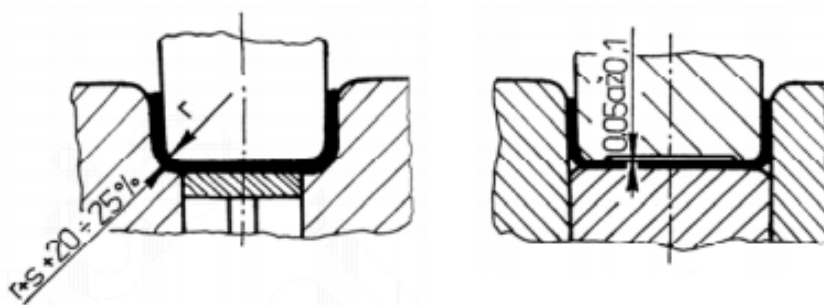


Obrázek 34, 35, 36: Vyztužení žebra (vlevo); řez žebrem (uprostřed); přibližné parametry žebra (vpravo)

Zdroj: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf> (vlevo, uprostřed);

[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm) (vpravo)

- Vybrání materiálu na čele ohybníku, dojde ke zpevnění ohýbaného materiálu v rozích
- Zmenšením mezery v místě ohybu v materiálu tzv.: deformační poloměr na ohybnici, dojde ke zpevnění materiálu v místě ohybu



Obrázek 37,38: Zpevnění v poloměru ohybu (vlevo); ubrání čela materiálu ohybníku (vpravo)

Zdroj: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>

- U velkých poloměrů ohybu lze použít ohyb, při kterém dojde současně o prodloužení materiálu o velikost 2 – 4% svoji délky. Pro velké poloměry  $\beta$  lze získat ze vztahu:

$$\beta \approx (180 - \alpha) \cdot \left( \frac{R}{R_p} - 1 \right) = (180 - \alpha) \cdot \left( \frac{R}{\left( \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{3 \cdot R_e}{E \cdot t}} \right)} - 1 \right) \quad (2.2.5.7.)$$

Odpružení po ohybu se využívá při funkci listových pružin, kdy každý jednotlivý list je provozně zatížen pouze v elastické deformaci, tedy maximálně do  $R_u$  materiálu.

## 2.3.6. Další defekty vytvořené po ohybu

Ohýbání s sebou nese i defekty. Mezi ně patří praskání, tvorba vln, deformace průřezu a odpružení.

- Jedním z častých defektů je tvorba trhlin na vnější straně ohybu, kdy na tažné straně je materiál deformován natolik, že je překročená míra pro soudržnost materiálu. Je to vlivem překročení tažnosti materiálu, nesprávnou osou ohybu, stavem materiálu (žhánění, tváření za studena), otřepy (na vnější straně ohybu) z procesu stříhání, zpevnění materiálu. Pro eliminaci trhlin vlivem překročení tažnosti je nutno dodržet tzv.: minimálního poloměru ohybu, při kterém je bráno v potaz, že  $\varphi_{\max}$  (vnějších vláken) =  $A$ . Minimální poloměr ohybu je určen vztahem:

Tabulka 8:  $R_{\min}$  pro různý materiál

Zdroj: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technologickost-konstrukce-pri-ohybani.html>

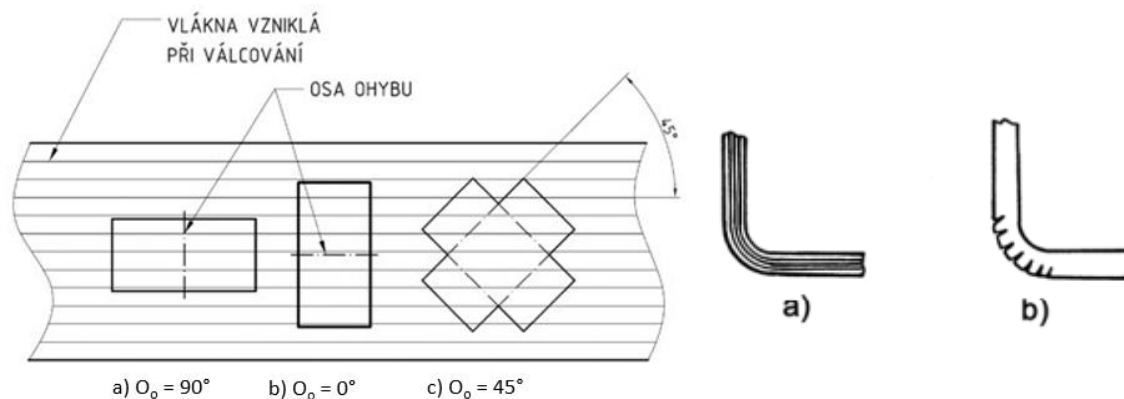
Tab. 1. Příklady minimálních hodnot poloměrů ohybu pro vybrané jakosti materiálů				
Materiál	Žháný		Zpevněný	
	Poloha os ohybu ke směru vláken			
	napříč	podél	napříč	podél
Hliník	0	0,2s	0,3s	0,8s
Měď			1,0s	2,0s
Mosaz			0,4s	0,8s
Ocel 12 011			0,2s	0,5s
Ocel 12 010	0	0,4s	0,4s	0,8s
Ocel 12 023	0,1s	0,5s	0,5s	1,0s
Ocel 12 024				
Ocel 12 030	0,2s	0,6s	0,6s	1,2s
Ocel 12 031				
Ocel 12 040	0,3s	0,8s	0,8s	1,5s
Ocel 12 041				
Ocel 12 050	0,5s	1,0s	1,0s	1,7s
Ocel 12 051				
Ocel 12 060	0,7s	1,3s	1,3s	2,0s
Ocel 12 061				
Duralium měkký	1,0s	1,5s	1,5s	2,5s
Duralium tvrdý	2,0s	3,0s	3,0s	4,0s

*s = tloušťka materiálu*

s = tloušťka materiálu

$$R_{\min} = \frac{t}{2} \cdot \left( \frac{1}{A} - 1 \right) [\text{mm}] \quad (2.2.6.8.)$$

Osa ohybu by vždy měla být kolmá na orientaci vláken materiálu, v případě nemožnosti je nutné zvýšit  $R_{\min}$  přibližně na dvojnásobek (tab.8). Pokud je zapotřebí dvojnásobného ohybu je vhodné volit osy ohybu s úhlem 45° od orientace vláken dle obrázku obr.40 a 41. Otřepy po stříhu by měly být pokud možno na vnitřní straně ohybu, pokud budou na vnější, je nutnost ty otřepy obrousit. [13] [14] [16]



Obrázek 40: Orientace vláken pro efektivní ohyb (vlevo), detail směru vláken po ohybu (vpravo)

Zdroj: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technologickost-konstrukce-pri-ohybani.html> (vlevo); <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf> (vpravo)

- Tvorba vln je častou vadou pro ohyb tenkostěnných součástí (tenké plechy, trubky) <sup>[16]</sup> (obr. 41), kdy defekt vzniká na vnitřní straně ohybu působením tlakových sil. Materiál vybočuje do stran z důvodu mále tuhosti vlivem malé tloušťky materiálu, kde tenká tloušťka materiálu zapříčiňuje vznik 3osé deformace.



Obrázek 41: Zvlnění tenkostěnné součásti

Zdroj:

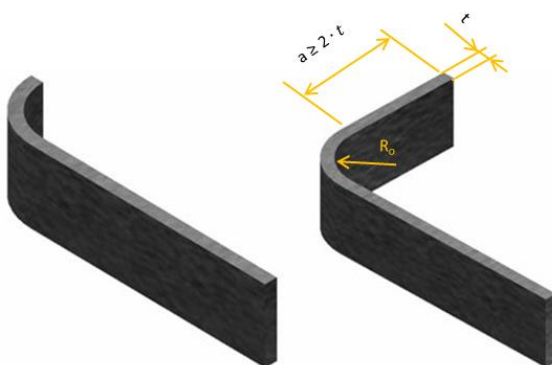
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/07.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm)



- Minimální velikost ramene od ohybu je nutné dodržet, aby došlo ke správnému ohybu. Pokud nedojde k dodržení  $l_{min}$ , materiál má tendenci se posunout k delší straně od ohybu viz. Obr.42.  $l_{min}$  závisí na tvrdosti materiálu, ale pro určení se využívá zejména vztahů:

$$l_{min} \geq 3 \cdot (t + R) \text{ [mm]}, \text{ podmínky } R \leq 1 \text{ mm}, l_{min} \geq 2 \text{ mm} \quad (2.2.6.9.)$$

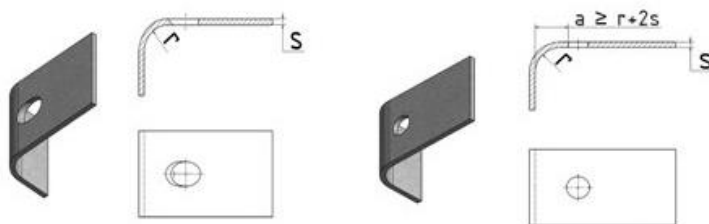
$$l_{min} \geq (2 - 3) \cdot t \text{ [mm]}, \text{ podmínka } R > 1 \text{ mm} \quad (2.2.6.10.)$$



Obrázek 42: Minimální délka ramene ( $a$ ), tloušťka materiálu ( $t$ )

Zdroj: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technolognost-konstrukce-pri-ohybani.html>

S tímto defektem je spojený defekt deformace díry v blízkosti ohybu, okraj díry by měl být odsazen od konce ohybu o velikost  $l_{min}$  (obr.43), reálné je pouze použití vztahu (2.2.6.10.) <sup>[14][18]</sup>



Obrázek 43: deformace díry a její opatření pro vznik. Vzdálenost od ohybu ( $a$ ), tloušťka materiálu ( $s$ ), poloměr ohybu ( $r$ )

Zdroj: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-technolognost-konstrukce-pri-ohybani.html>

### 3. Experimentální část

Cílem experimentální části předkládané DP bylo určení velikosti odpružení dvoufázové oceli DP 500 v závislosti na technologických parametrech při ohybu do tvaru „V“. Prováděné zkoušky vedoucí k naplnění zadání DP byly voleny takto:

- Statická zkouška tahem pro stanovení základních mechanických hodnot testovaného materiálu ve směrech odebrání vzorků  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vzhledem ke směru válcování
- Zkouška ohybem do tvaru „V“ pro stanovení vlivu poloměru zaoblení ohybníku na velikost odpružení ve směrech odebrání vzorků  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vzhledem ke směru válcování
- Zkouška ohybem do tvaru „V“ pro stanovení vlivu velikosti kalibrační síly na velikost odpružení ve směrech odebrání vzorků  $0^\circ$  a  $90^\circ$  vzhledem ke směru válcování

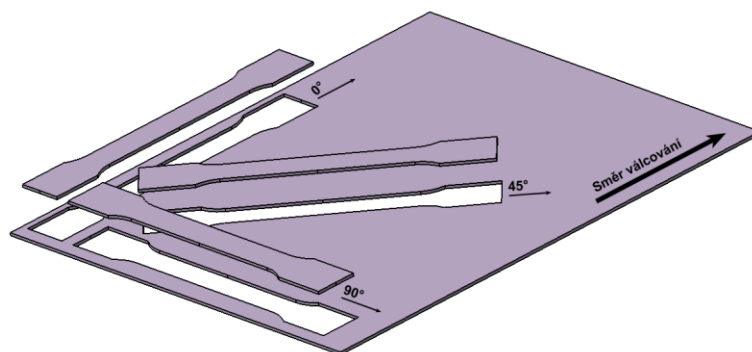
Pro veškeré experimentální zkoušky byl použit elektrolyticky pozinkovaný materiál o jmenovité tloušťce 0,6 mm s označením HCT500X+ZE (dle EN 10346) popř. CR290Y490HT-DP (označení dle VW 50065), výrobce Thyssen Krupp Stahl. Testovaný materiál je dále v textu označován jako DP 500.

#### 3.1. Statická zkouška tahem

##### 3.1.1. Příprava vzorků

Zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem byly odebrány ve směru  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  vzhledem ke směru válcování. Způsob odebrání zkušebních vzorků je patrný z obr. 44. Pro každý směr bylo testováno vždy 5 vzorků. Zkušební vzorky testovaného materiálu byly zhotoveny stříháním s následným broušením střížných ploch. Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1 [norma, odkaz].





Obrázek 44: Ilustrace odebrání vzorku z polotovaru

Zdroj: [www.ksp.tul.cz](http://www.ksp.tul.cz)

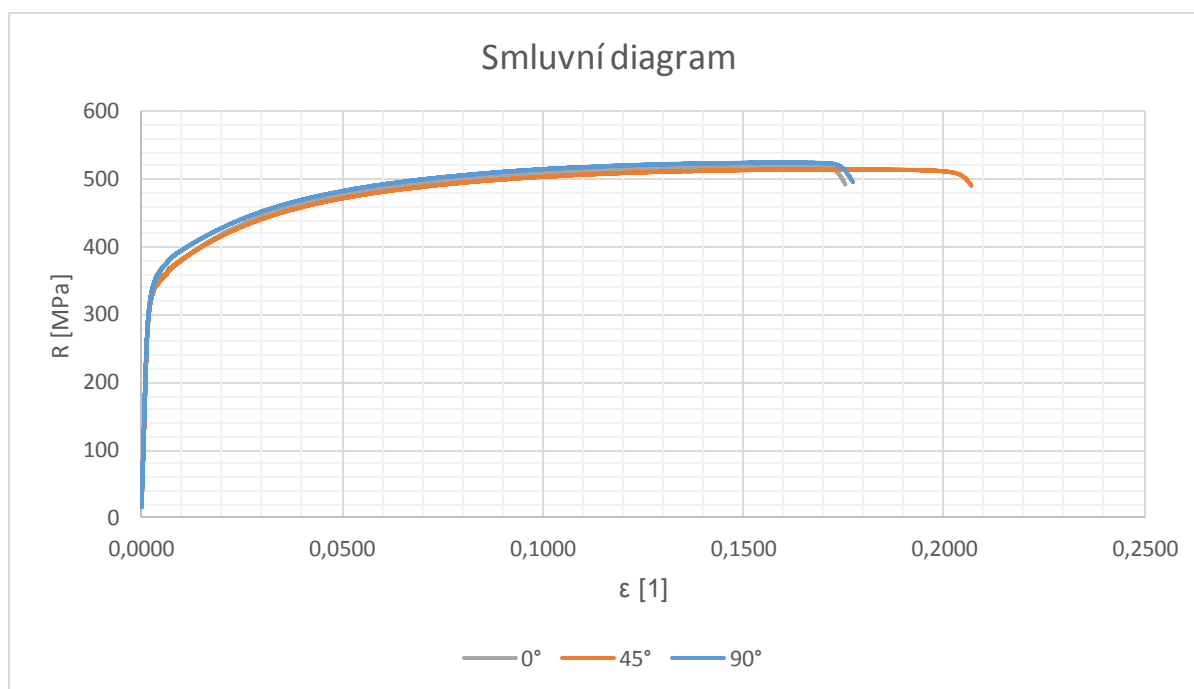
### 3.1.2. Výsledky měření

Statická zkouška tahem byla provedena na stroji TIRA Test 2300 s použitím software Labtest 4.9 pro zpracování naměřených dat a vyhodnocení základních charakteristik ( $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A_{80mm}$ ,  $A_g$ ). Hodnoty materiálových charakteristik zjištěných výše popsaným způsobem byly zpracovány do tabulky Tab.9, kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru  $s$ . Metodika provedení a vyhodnocení statické zkoušky tahem je v souladu s výše uvedenou normou ČSN EN ISO 6892-1. Příklady pracovních diagramů ze statické zkoušky tahem pro testovaný materiál jsou vidět na Obr. 45. Protokoly dokladující provedení testů pomocí statické zkoušky tahem jsou uvedeny v příloze XY.

Tabulka 9: Vlastnosti ocele DP 500 po tahové zkoušce

Zdroj: Vlastní

Poloha vláken při testu	$R_{p0,2}$ [Mpa]	$R_m$ [Mpa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]	-
0°	344,10	520,60	15,52	17,35	$\bar{X}$
	<b>0,70</b>	<b>1,10</b>	<b>0,12</b>	<b>0,26</b>	$\sigma$
45°	345,50	515,80	16,78	20,54	$\bar{X}$
	<b>2,40</b>	<b>1,00</b>	<b>0,21</b>	<b>0,16</b>	$\sigma$
90°	356,80	525,90	15,79	17,60	$\bar{X}$
	<b>0,90</b>	<b>0,70</b>	<b>0,14</b>	<b>0,10</b>	$\sigma$



Obrázek 45: Tahová zkouška oceli DP500 při rozdílné orientaci v rámci tahu – TIRA test 2300

Zdroj: vlastní

## 3.2. Vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení

### 3.2.1. Příprava vzorků

Výzkum vlivu poloměru ohybníku na velikost odpružení byl prováděn pro 5 různých poloměrů zaoblení. S ohledem na stávající nástrojové vybavení laboratoří KSP byly voleny poloměry R1; R1,2; R2,2; R4; R7. Pro každý zvolený poloměr ohybu bylo z důvodu předpokládaného kolísání naměřených hodnot vždy měřeno 10x vzorků při zachování stejných technologických podmínek. Tento počet měření byl ze statistického pohledu dostatečným souborem pro získání relevantních výsledků prováděného experimentu. Vzhledem k anizotropii mechanických vlastností testovaného materiálu byl dále testován vliv směru odebrání vzorků vzhledem ke směru válcování. Vzorky byly odebírány ve směru 0° a 90° vzhledem ke směru válcování plechu. Pro dílčí experiment určující vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení tak bylo nutné připravit soubor 100 vzorků (5 x rádius x 10 opakování x 2 směry odebrání vzorků). Vzorky pro experiment byly zhotoveny stříháním na tabulových nůžkách DURMA - MS 2504 (obr.46). Z dodaného materiálu pro experimentální zkoušky byly nastříhány pásy plechu o šířce 60 mm ve směru

válcování a kolmo na směr válcování. Následně byly z takto zhotovených polotovarů vystřiženy jednotlivé vzorky o rozměru 20 mm x 60 mm Obr. 49 v počtu 50 ks pro každý směr odebrání. Princip přípravy vzorků je patrný z Obr. 47 a obr. 48 Vzorky po stříhání již nebyly dále jinak upravovány (broušení, čištění atd.).



Obrázek 46,47: Tabulové nůžky DURMA – MS 2504 (vlevo); stříh vzorku (vpravo)

Zdroje: <http://www.acra.com.au/products/new-machinery/guillotines/ms-series-mechanical-guillotine/> (vlevo); vlastní (vpravo)



Obrázek 48,49: Rozložení polotovaru pro stříh všech vzorků (vlevo); finální podoba testovacího vzorku (vpravo)

Zdroje: Vlastní (oba)

### 3.2.2. Provedení experimentu

Experiment pro stanovení vlivu poloměru zaoblení ohybníku na velikost odpružení byl proveden v laboratořích KSP TU v Liberci. V rámci experimentu bylo nutné provést ohyb do tvaru „V“ s úhlem ohybu 90° při použití různých poloměrů zaoblení ohybníku a respektování směru odebrání vzorků. Pro tyto účely byl použit zkušební nástroj, jehož konstrukce umožňuje současné provedení ohybu 5 vzorků s různým poloměrem ohybu (R1; R1,2; R2,2; R4; R7). Nástroj byl umístěn na výstředníkovém lisu s označením LEN-P 40. Měření bylo opakováno vždy 10x. Lis použitý pro experimenty (obr. 50) a konstrukce vrchní části (pohyblivé) ohýbacího nástroje jsou patrné z obrázku Obr. 51.



Obrázek 50,51: Výstředníkový lis LEN-P 40 (vlevo); Soustava pěti ohybníků (vpravo)

Zdroje: Vlastní (oba)

Po provedení každého jednotlivého ohybu byly jednotlivé vzorky vždy pečlivě vyjímány z ohýbacího nástroje a následně popsány a roztříděny dle parametrů ohybu (viz obr 52). Tímto způsobem byla vyloučena následná záměna testovaných vzorků i případné ovlivnění výsledků měření. Při manipulaci se vzorky bylo nutné zabránit jejich případné deformaci, aby se neznehodnotil celkový výstup z experimentu. Ani jeden z testovaných vzorků nespadl na zem a neutrpěl jakoukoli jinou deformaci. Veškeré vzorky tak byly připraveny na následné měření velikosti odpružení na 3D měřicím zařízení SOMET XYZ 643 C.



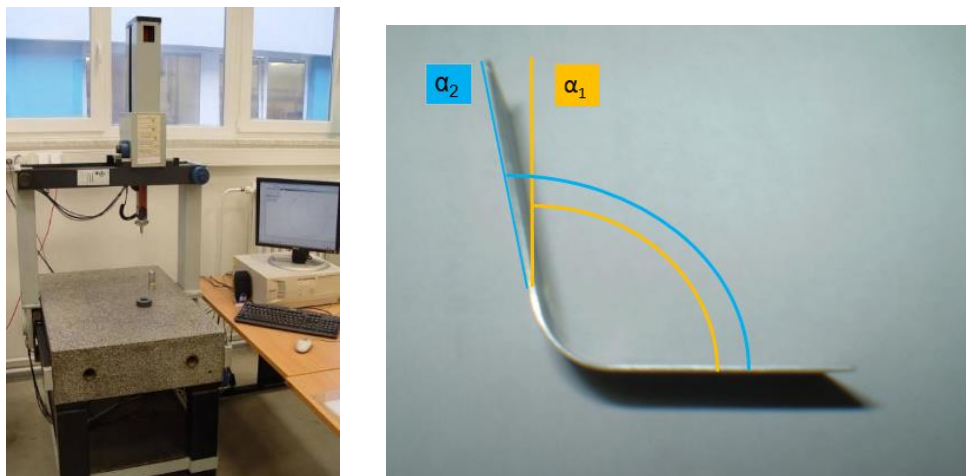
Obrázek 52: Roztříděné vzorky připravené na 3D měření

Zdroj: Vlastní

### 3.2.3. Výsledky měření

Analýza velikosti odpružení testovaných vzorků byla provedena pomocí souřadnicového měřicího přístroje SOMET XYZ 464 (viz obr. 53) v laboratoři KVS TU v Liberci. Každý jednotlivý vzorek z provedených měření byl měřen samostatně, tak aby nemohlo dojít k záměně vzorků a znehodnocení zkoušek. Na vzorcích byl měřen úhel ramen  $\alpha_2$ , tak jak je patrné z obr. 54. Hledaný úhel  $\alpha_2$  byl zjišťován pomocí softwaru Tango!3D určujícího vzájemný úhel mezi dvěma pomocnými rovinami na vnějších stranách ramen měřeného vzorku. Každá z těchto rovin byla definována

čtyřmi body náležející vnějším plochám měřených ramen vzorku. Na základě znalosti obou rovin software Tango!3D vypočítal hledaný úhel  $\alpha_2$ .



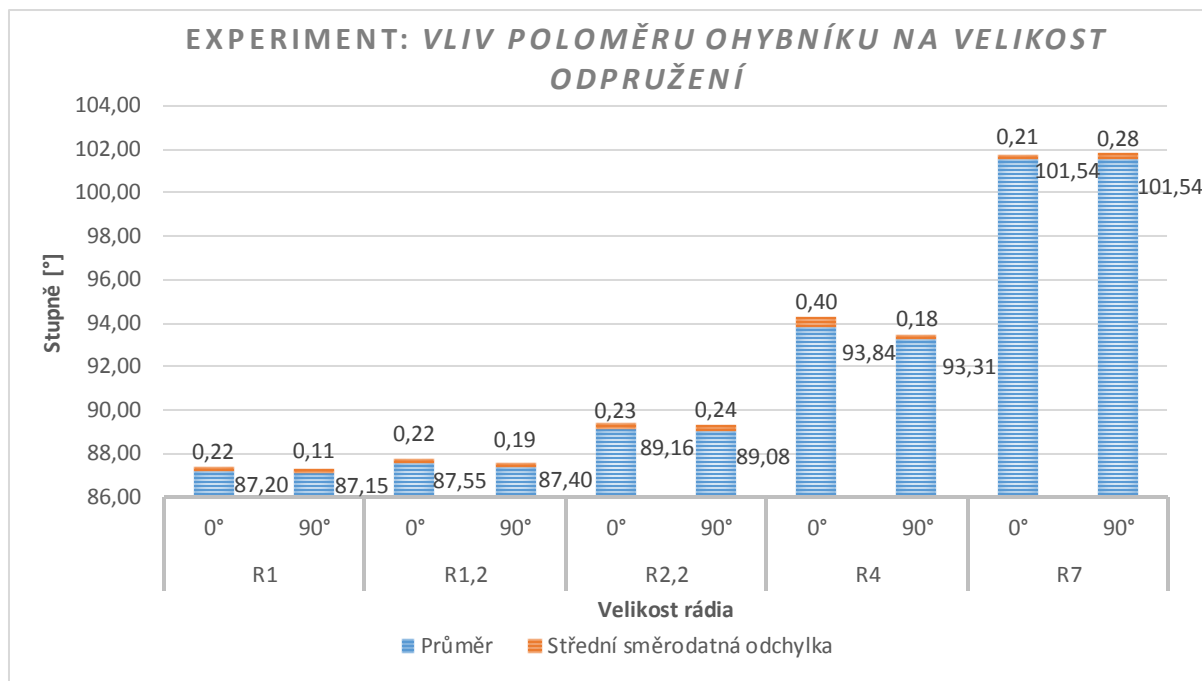
Obrázek 53,54: Souřadnicový měřicí přístroj SOMET XYZ 464 (vlevo); vyobrazení úhlů na ohnutém vzorku (vpravo)

Zdroje: <http://www.mesitmachining.cz/merici-pristroje-a-zarizeni> (vlevo); vlastní (vpravo)

Získané hodnoty velikosti úhlu  $\alpha_2$  byly průběžně zapisovány a převedeny do elektronické podoby (tab. 10). Průměrné hodnoty a střední směrodatné odchylky jsou znázorněny v grafech (obr. 55). Ze kterých se vychází při vyhodnocení výsledků.

Tabulka 10: Naměřené výsledky z experimentu  
Zdroj: Vlastní

Experiment: Vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení										
	R1		R1,2		R2,2		R4		R7	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
1.	87,36	87,30	87,43	87,52	88,99	89,31	93,68	93,51	101,66	101,50
2.	87,54	87,27	87,67	87,54	89,12	88,73	93,74	93,58	101,30	101,21
3.	87,08	87,18	87,67	87,77	88,84	88,87	93,43	93,44	101,72	101,46
4.	87,43	87,22	87,17	87,25	89,42	89,14	94,10	93,40	101,84	101,47
5.	86,94	87,04	87,70	87,45	89,00	89,48	94,23	93,30	101,52	102,24
6.	87,37	87,18	87,39	87,23	89,14	89,16	94,27	93,18	101,27	101,51
7.	87,00	87,03	87,39	87,43	89,53	88,88	94,21	93,07	101,69	101,26
8.	87,08	86,98	87,77	87,13	89,10	89,23	93,20	93,08	101,68	101,67
9.	87,20	87,10	87,85	87,30	88,98	88,85	94,17	93,31	101,45	101,62
10.	86,96	87,21	87,42	87,41	89,43	89,13	93,40	93,19	101,26	101,44
$\bar{x}$	87,20	87,15	87,55	87,40	89,16	89,08	93,84	93,31	101,54	101,54
$\sigma$	0,22	0,11	0,22	0,19	0,23	0,24	0,40	0,18	0,21	0,28

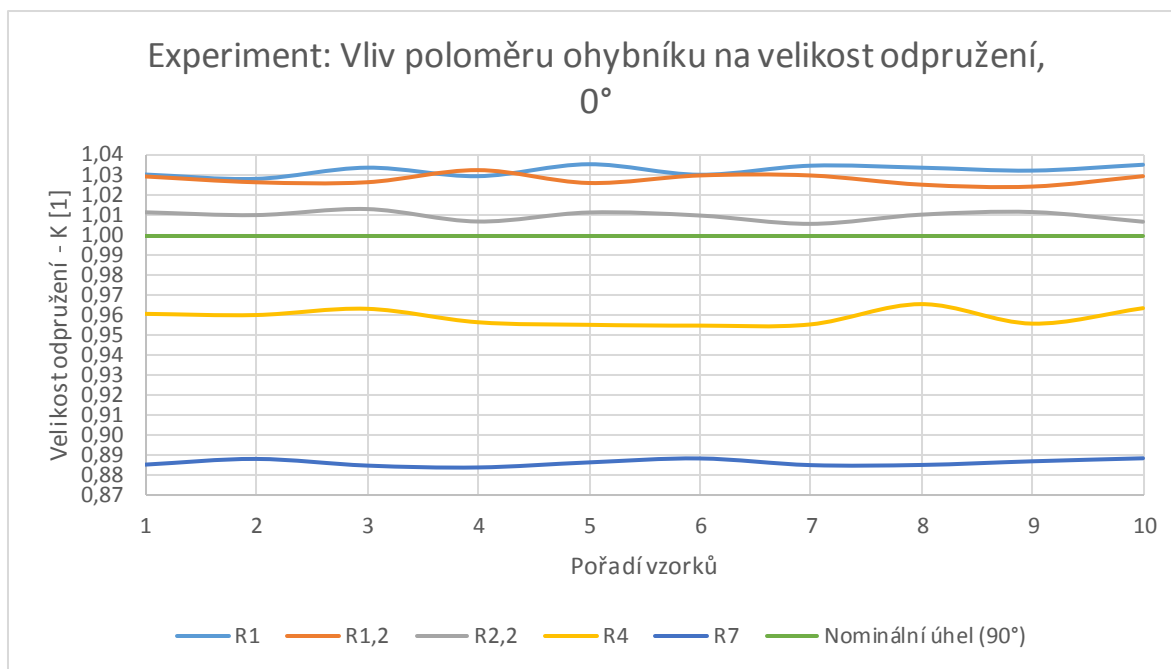


Obrázek 55: Průměrná hodnota a střední směrodatná odchylka naměřených dat z experimentu Vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení

Zdroj: Vlastní

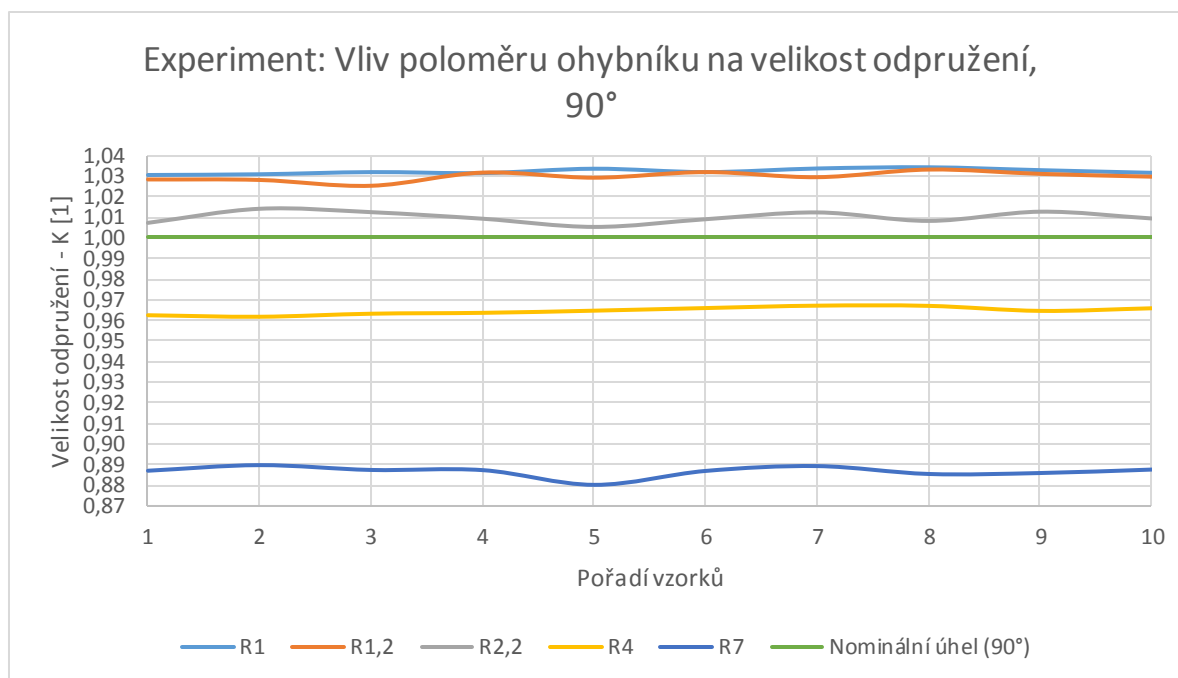
### 3.2.4. Vyhodnocení výsledků měření

Z naměřených výsledků měření je pomocí statistického testu možno posoudit, zda má velikost poloměru zaoblení ohybníku a směr odebrání vzorků vliv na velikost odpružení. Pro test vlivu směru odebrání na velikost odpružení byl volen Studentův T-test, výsledky testů jsou v tabulkách Tab.11. Pro test vlivu velikosti poloměru zaoblení ohybníku na velikost odpružení byl volen Anova test výsledky testů jsou v tabulkách Tab.12 a Tab.13. Veškeré analyzované hodnoty byly použity z tabulky Tab. 10. Výpočet byl uskutečněn v softwaru Excel. Srovnání velikosti odpružení celého experimentu je vidět na Obr. 56, 57, byly sestaveny ze vztahu: (2.2.5.4.).



Obrázek 56: Rozsah velikosti odpružení při změně velikosti testovaných poloměrů ohybu skrze všechny testované vzorky, směr odebrání  $0^\circ$

Zdroj: Vlastní



Obrázek 57: Rozsah velikosti odpružení při změně velikosti testovaných poloměrů ohybu skrze všechny testované vzorky, směr odebrání  $90^\circ$

Zdroj: Vlastní



Tabulka 11: Ukázka Studentova T-test, Rádus R7

Dvouvýběrový párový t-test na střední hodnotu

	<i>Soubor 1</i>	<i>Soubor 2</i>
Stř. hodnota	101,539	101,538
Rozptyl	0,04403222	0,08048444
Pozorování	10	10
Pears. korelace	0,0561428	
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	9	
t Stat	0,0092123	
P(T<=t) (1)	0,49642536	
t krit (1)	1,83311293	
P(T<=t) (2)	0,99285073	
t krit (2)	2,26215716	

Tabulka 12: Anova test, směr 0°

Anova: jeden faktor

Faktor					
	<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
Sloupec1		10	871,96	87,196	0,046316
Sloupec2		10	875,46	87,546	0,046271
Sloupec3		10	891,55	89,155	0,05245
Sloupec4		10	938,43	93,843	0,161912
Sloupec5		10	1015,39	101,539	0,044032

ANOVA

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota</i>	
					<i>P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	1452,958	4	363,2394	5174,629	2,739E-59	2,578739
Všechny výběry	3,15883	45	0,070196			
Celkem	1456,116	49				

Tabulka 13: Anova test, směr 90°

Anova: jeden faktor

Faktor					
	<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>
Sloupec1		10	871,51	87,151	0,011677
Sloupec2		10	874,03	87,403	0,03429
Sloupec3		10	890,78	89,078	0,056373
Sloupec4		10	933,06	93,306	0,031071
Sloupec5		10	1015,38	101,538	0,080484

ANOVA



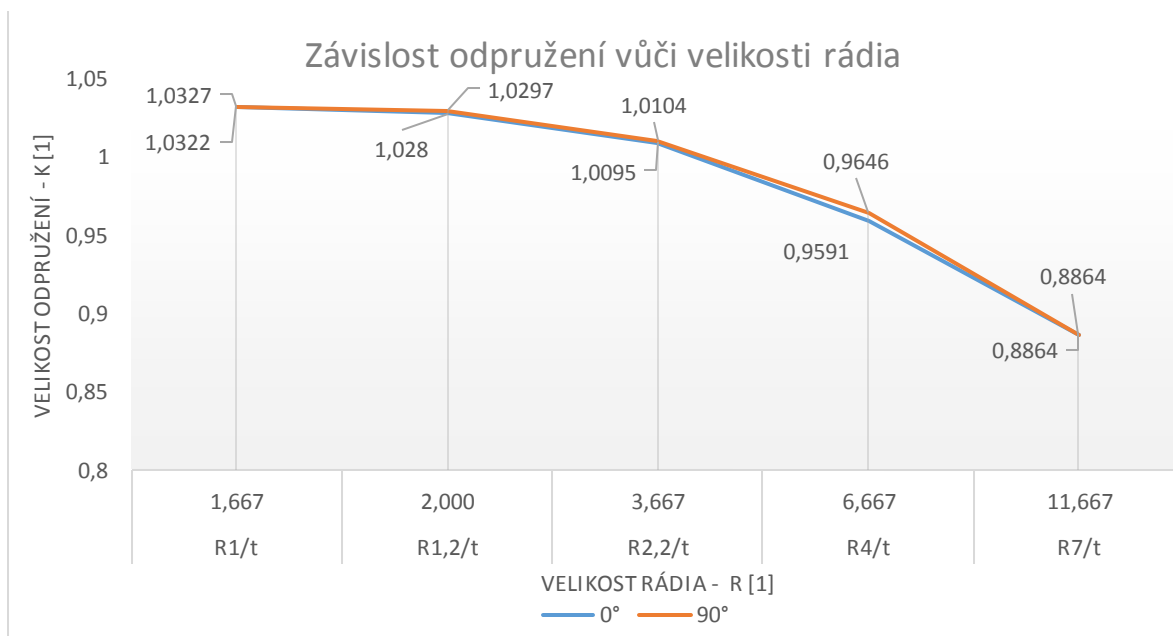
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota	
					P	F krit
Mezi výběry	1453,979	4	363,4946	8497,013	3,98E-64	2,578739
Všechny výběry	1,92506	45	0,042779			
Celkem	1455,904	49				

Ze Studentova testu vyšlo, že vliv odebrání nemá vliv na velikost odpružení. Z obou testů Anovy, že poloměr ohybu R má vliv na velikost odpružení. Z grafů (obr.56, 57) je patrné, že nejvhodnější z rádií na tloušťku (0,6 mm) materiálu byl rádius R2,2. Došlo u něj k nejmenšímu odpružení a nejlépe splňoval požadovaný úhel ohybu (90°). Rádiusy R1 a R1,2 jsou ostré úhly, vlivem napěchování vzorku do nástroje. U vzorků s rádiusy ohybu R4 a R7 bylo výrazná změna úhlu, úhly těchto vzorků byly tupý.

Pro sestavení grafu odpružení na velikosti rádia je nutné stanovit hodnoty pro velikost rádia vůči tloušťce materiálu (tab. 14).

Tabulka 14: Poměr velikosti rádia vůči velikost tloušťky materiálu  
Zdroj: Vlastní

R1/t	1,667
R1,2/t	2,000
R2,2/t	3,667
R4/t	6,667
R7/t	11,667



Obrázek 58: Závislost změny odpružení při změně velikosti rádia ohybu

Zdroj: Vlastní

Ze zkoušky vyplývá, že čím je rádius ohybu větší tím vzrůstá velikost odpružení. Z grafu (obr. 58) si můžeme povšimnout, že směr vláken v materiálu nemá významný vliv na velikost odpružení. Je patrné, že rádius R2,2 je nejvhodnější pro tloušťku materiálu 0,6 mm.

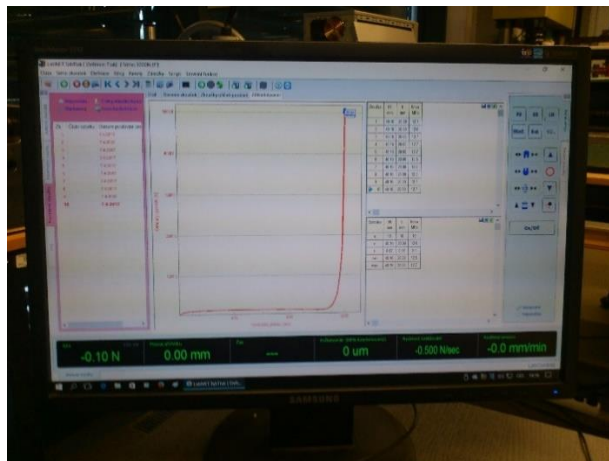
### 3.3. Vliv velikosti kalibrační síly na velikost odpružení

#### 3.3.1. Příprava vzorků

Příprava vzorků pro experiment byla analogická jako v případě předchozího experimentu a je popsána v kapitole 3.2.1. Pro dílčí experiment určující velikost kalibrační síly na velikost odpružení, tak bylo nutné připravit soubor 80 vzorků (4 kalibrační síly x 10 opakování x 2 směry odebrání vzorků).

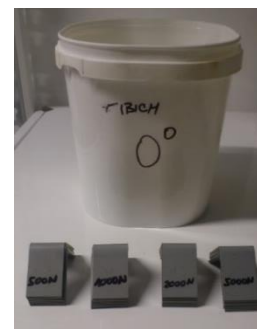
#### 3.3.2 Provedení experimentu

Experiment pro stanovení vlivu velikosti kalibrační síly na velikost odpružení byl proveden v laboratořích KSP TU v Liberci. V rámci experimentu bylo nutné provést ohyb do tvaru „V“ s úhlem ohybu  $90^\circ$  při použití různých kalibračních sil a respektování směru odebrání vzorků. Testovalo se na stejném nástroji jako v předchozím experimentu, ale pouze na jednom poloměru ohybu R2,2. Testovaly se 4 kalibrační síly ( $F_1 = 500\text{N}$ ;  $F_2 = 1\text{kN}$ ;  $F_3 = 2\text{kN}$ ;  $F_4 = 5\text{kN}$ ) po 10 opakování. Experiment se konal na trhačím zařízení s označením TIRA test 2300 (obr. 59). Upevnění ohybnice bylo uchyceno na posuvném příčniku a soustava ohybníků byla upnuta v čelistích trhačního stroje. Měření probíhalo v softwaru LabNET, měření lze vidět na obr. 60. Test probíhal nejprve podle orientace odebrání, nejprve  $0^\circ$  posléze  $90^\circ$ , v rámci každé kalibrační síly (obr. 61). Průběhy každé ze série testů je možno vidět v grafech (obr. 64 až 71). Ihned po ukončení ohybu proběhlo roztřízení s popisem dle parametru kalibrace na vzorku obr. 62 a 63. Popsaným postupem byla vyloučena záměna testovaných vzorků i případné ovlivnění výsledků měření. Při manipulaci se vzorky bylo nutné zabránit jejich případné deformaci, aby se nezhodnotil celkový výstup z experimentu. Ani jeden z testovaných vzorků nespadl na zem a neutrpěl jakoukoli jinou deformaci. Veškeré vzorky tak byly připraveny na následné měření velikosti odpružení na 3D měřícím zařízení SOMET XYZ 643 C.



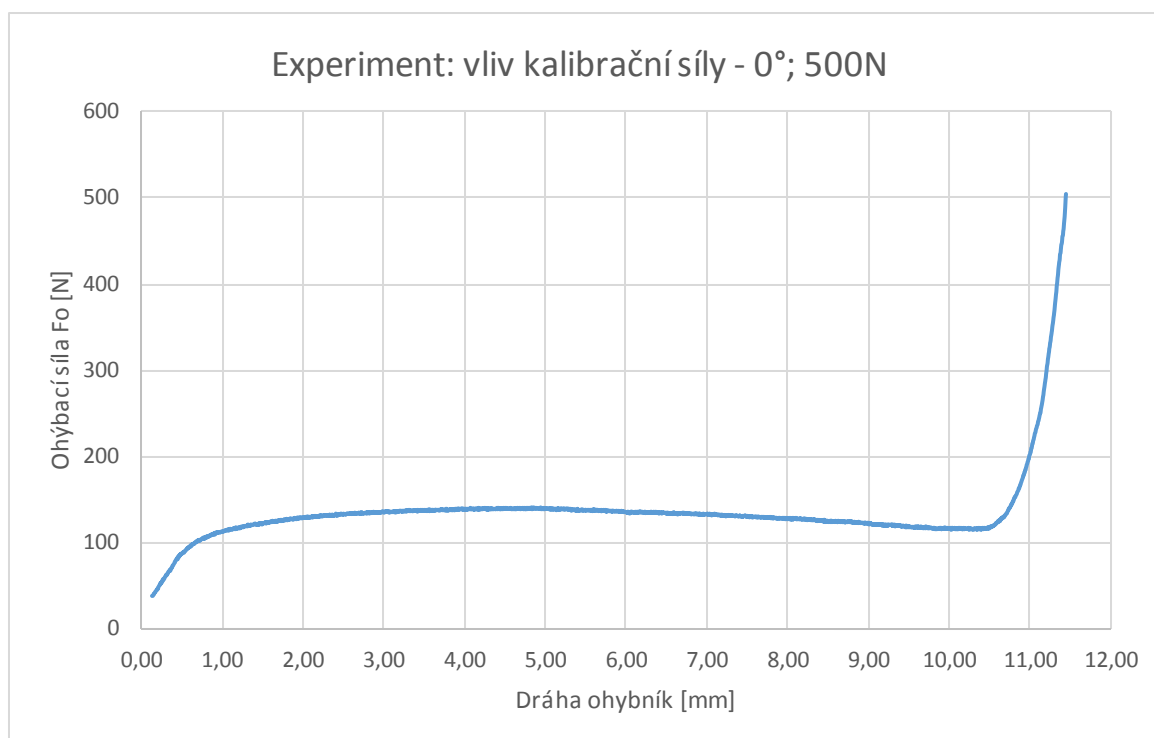
Obrázek 59,60: Přístroj TIRA test 2300 (vlevo), software LabNET (vpravo)

Zdroje: Vlastní (oba)



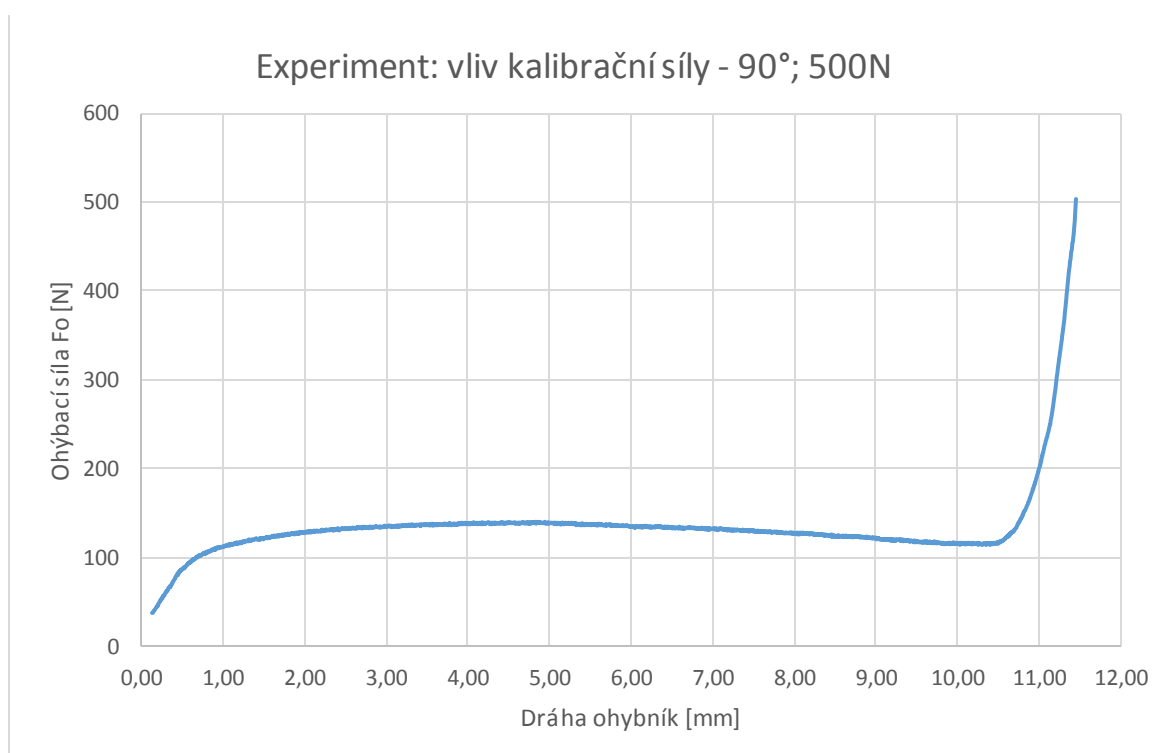
Obrázek 61,62 a 63: Ohyb vzorku na R2,2 (vlevo), ohnuté vzorky s orientací vláken 90° (uprostřed) a 0° (vpravo) z experimentu: vliv kalibrační síly na velikost odpružení

Zdroje: vlastní (všechny)



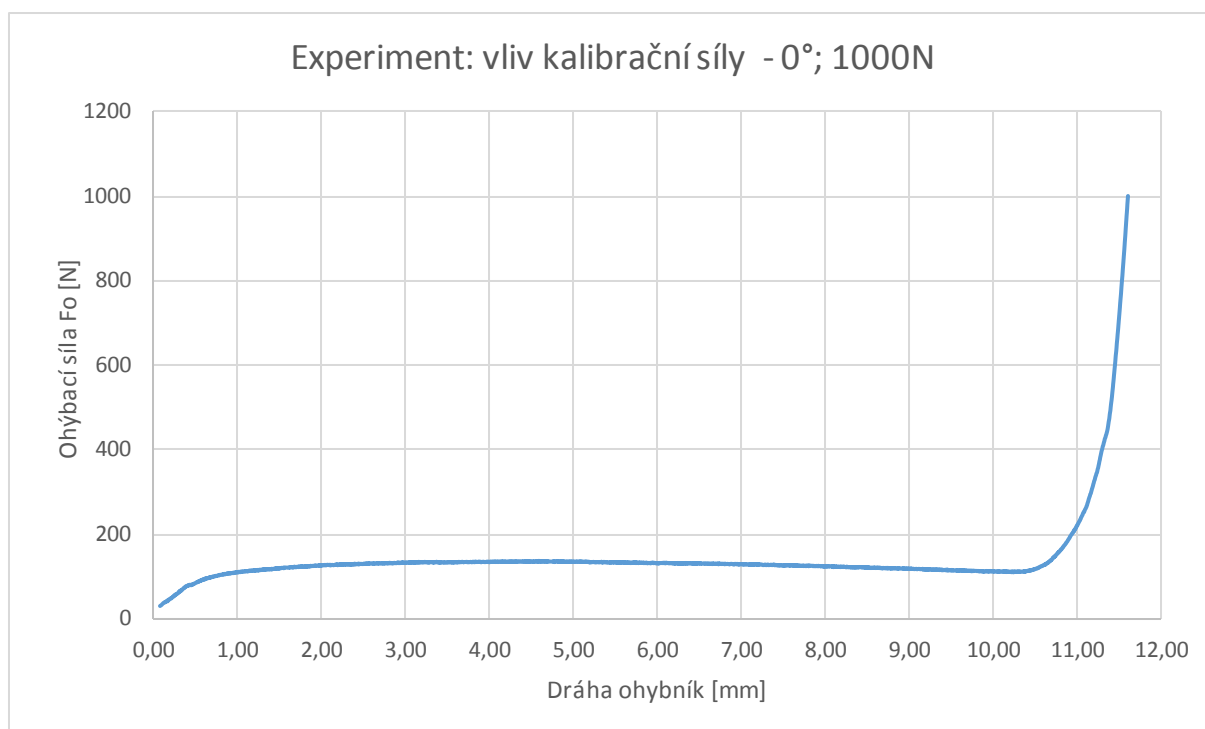
Obrázek 64: Kalibrační síla 500N, Osa ohybu 0° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



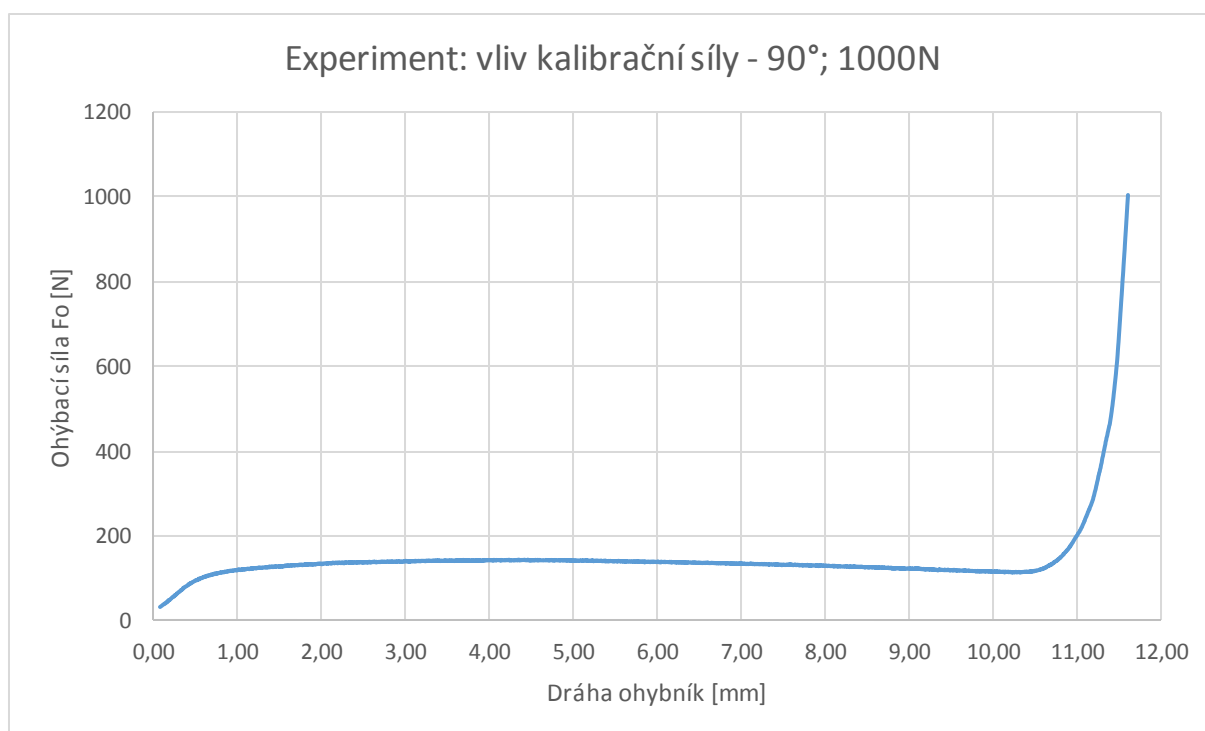
Obrázek 65: Kalibrační síla 500N, Osa ohybu 90° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



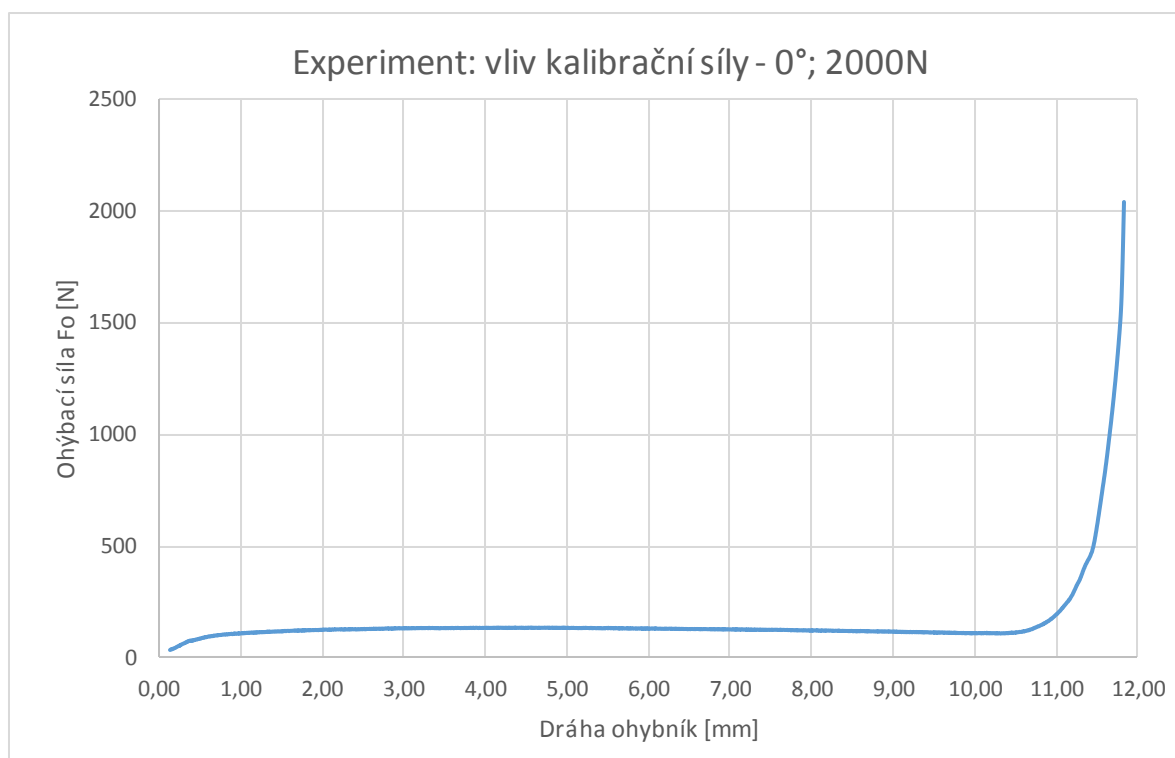
Obrázek 66: Kalibrační síla 1000N, Osa ohybu 0° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



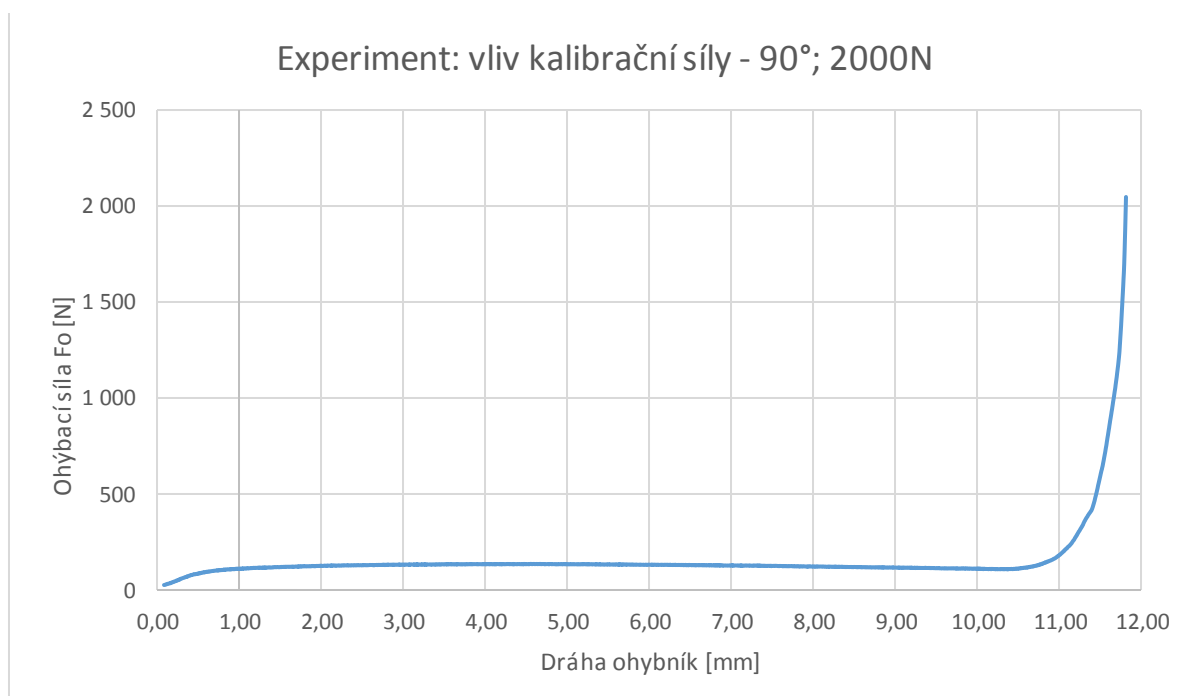
Obrázek 67: Kalibrační síla 1000N, Osa ohybu 90° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



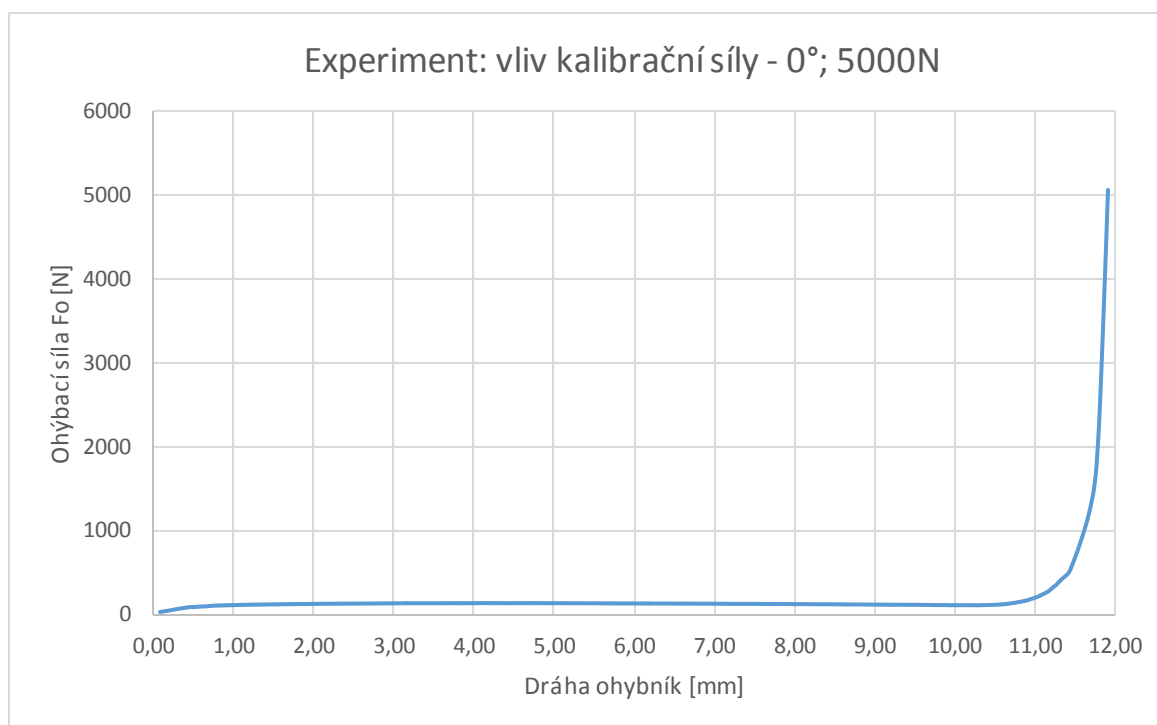
Obrázek 68: Kalibrační síla 2000N, Osa ohybu 0° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



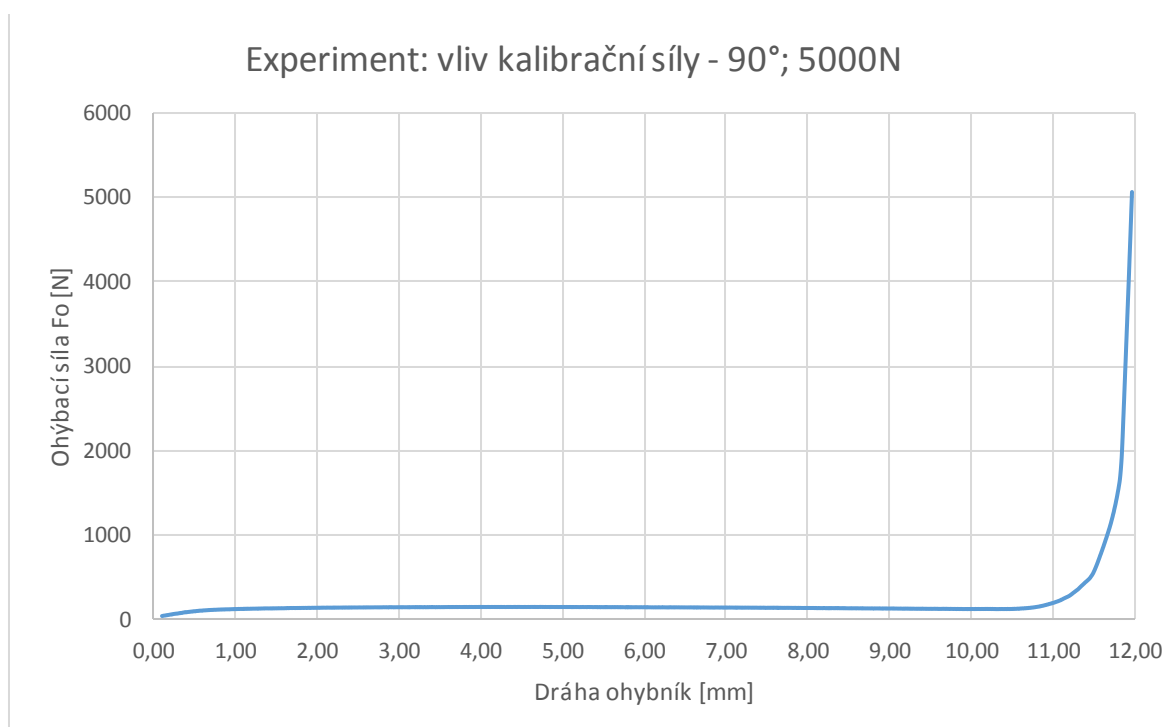
Obrázek 69: Kalibrační síla 2000N, Osa ohybu 90° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



Obrázek 70: Kalibrační síla 5000N, Osa ohybu 0° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní



Obrázek 71: Kalibrační síla 5000N, Osa ohybu 90° vůči směru vláken materiálu

Zdroj: Vlastní

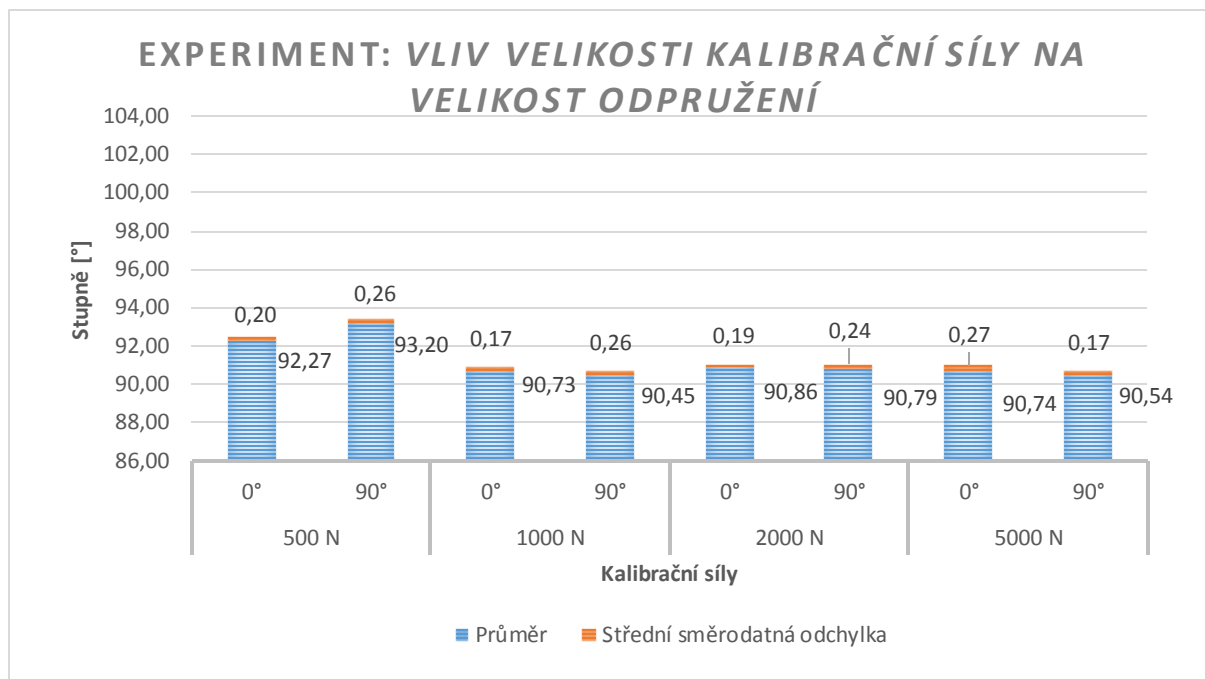
### 3.3.3. Výsledky měření

Analýza měření vzorků byla uskutečněna analogicky jako v případě experimentu popsaného v kapitole 3.2.3 “Vliv poloměru ohybníku na velikost odpružení”. Veškeré naměřené hodnoty lze vidět v tabulce Tab. 15, kde lze najít střední hodnotu a střední směrodatnou odchylku ke každé sérii. Srovnání středních hodnot a směrodatných odchylek lze vidět na obrázku obr. 72.

Tabulka 15: Naměřené výsledky z experimentu  
Zdroj: Vlastní

Experiment: Vliv velikosti kalibrační síly na velikost odpružení								
	500 N		1000 N		2000 N		5000 N	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
1.	92,18	93,12	90,99	90,74	91,00	90,54	90,59	90,43
2.	92,27	92,68	90,54	90,61	90,53	90,76	90,50	90,62
3.	92,17	93,42	90,99	90,21	90,95	91,22	90,70	90,24
4.	92,00	93,35	90,73	90,77	91,19	90,88	90,77	90,81
5.	92,21	93,26	90,61	90,31	90,76	90,91	90,76	90,53
6.	92,09	93,12	90,51	90,46	90,89	90,77	90,77	90,53
7.	92,38	92,86	90,76	90,68	91,02	90,98	91,46	90,79
8.	92,21	93,31	90,78	90,57	90,70	90,81	90,51	90,44
9.	92,49	93,46	90,75	90,11	90,69	90,64	90,59	90,55
10.	92,66	93,39	90,63	90,06	90,85	90,34	90,73	90,42
$\bar{x}$	<b>92,27</b>	<b>93,20</b>	<b>90,73</b>	<b>90,45</b>	<b>90,86</b>	<b>90,79</b>	<b>90,74</b>	<b>90,54</b>
$\sigma$	<b>0,20</b>	<b>0,26</b>	<b>0,17</b>	<b>0,26</b>	<b>0,19</b>	<b>0,24</b>	<b>0,27</b>	<b>0,17</b>





Obrázek 72: Průměrná hodnota a střední směrodatná odchylka naměřených dat z experimentu: Vliv velikosti kalibrační síly na velikost odpružení

Zdroj: Vlastní

### 3.3.4. Vyhodnocení výsledků měření

Z naměřených výsledků měření je pomocí statistického testu možno posoudit, zda má velikost kalibrační síly a směr odebrání vzorků vliv na velikost odpružení. Pro test vlivu směru odebrání na velikost odpružení byl volen Studentův T-test (tab. 16). Pro test vlivu velikosti kalibrační síly na velikost odpružení byl volen Anova test (tab. 17 až 20). Veškeré analyzované hodnoty byly použity z tabulky Tab. 15. Výpočet byl uskutečněn v softwaru Excel. Srovnání velikosti odpružení celého experimentu je vidět na Obr. 73, 74, byly sestaveny ze vztahu: (2.2.5.4.).

Tabulka 16: Ukázka Studentova testu, kalibrační síla 5000N

Zdroj: Vlastní

Dvouvýběrový párový t-test na střední hodnotu

	Soubor 1	Soubor 2
Stř. hodnota	90,738	90,536
Rozptyl	0,075306667	0,029827
Pozorování	10	10
Pears. korelace	0,514650634	
Hyp. rozdíl stř. hodnot	0	
Rozdíl	9	
t Stat	2,690915917	

P(T≤t) (1)	0,012379672
t krit (1)	1,833112933
P(T≤t) (2)	0,024759344
t krit (2)	2,262157163

Tabulka 17: Anova test, odebrání materiálu 0°

Zdroj: Vlastní

Anova: jeden faktor

Faktor				
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Sloupec 1	10	922,66	92,266	0,038116
Sloupec 2	10	907,29	90,729	0,027543
Sloupec 3	10	908,58	90,858	0,037396
Sloupec 4	10	907,38	90,738	0,075307

#### ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	16,77685	3	5,592282	125,4148	4,082E-19	2,866266
Všechny výběry	1,60525	36	0,04459			
Celkem	18,3821	39				

Tabulka 18: Anova test, odebrání materiálu 90°

Zdroj: Vlastní

Anova: jeden faktor

Faktor

Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Sloupec 1	10	931,97	93,197	0,065446
Sloupec 2	10	904,52	90,452	0,069373
Sloupec 3	10	907,85	90,785	0,059161
Sloupec 4	10	905,36	90,536	0,029827

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	51,53409	3	17,17803	307,0155	1,0908E-25	2,866266
Všechny výběry	2,01426	36	0,055952			
Celkem	53,54835	39				

Tabulka 19: Anova test, odebrání materiálu 0°, kalibrační síla 1000N-5000N

Zdroj: Vlastní

Anova: jeden faktor

Faktor

Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Sloupec 1	10	907,29	90,729	0,027543
Sloupec 2	10	908,58	90,858	0,037396
Sloupec 3	10	907,38	90,738	0,075307

ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	0,10374	2	0,05187	1,109554	0,3442762	3,354131
Všechny výběry	1,26221	27	0,046749			
Celkem	1,36595	29				

Tabulka 20: Anova test, odebrání materiálu 90°, kalibrační síla 1000N-5000N

Zdroj: Vlastní

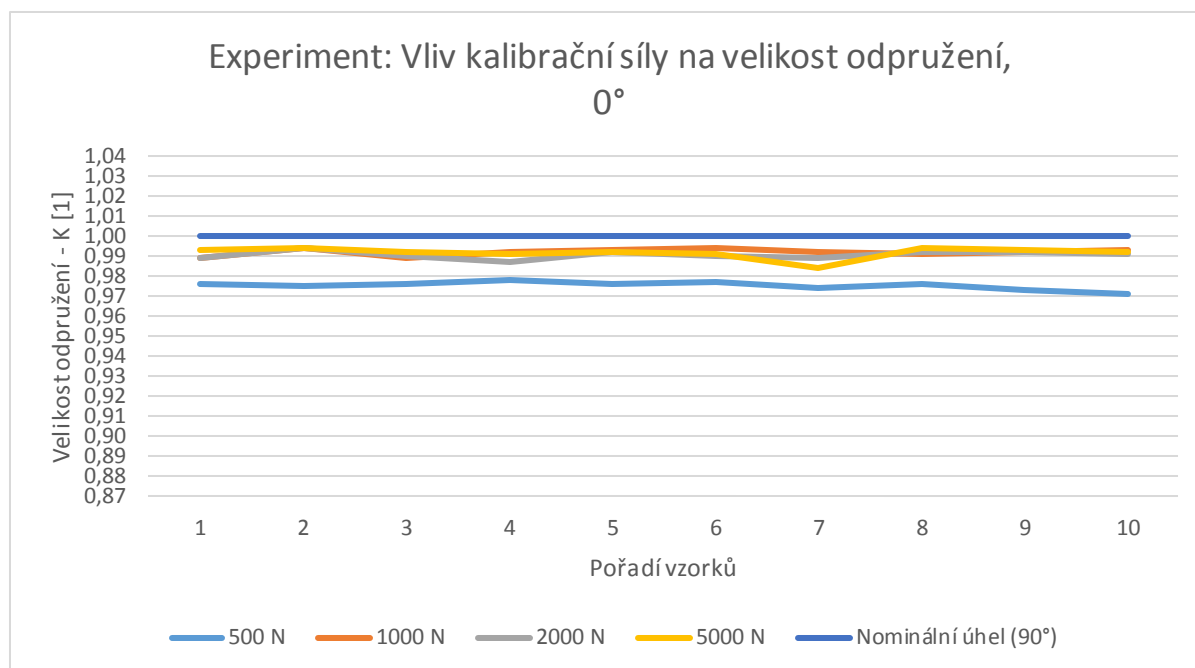
Anova: jeden faktor

Faktor

Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Sloupec 1	10	904,52	90,452	0,069373
Sloupec 2	10	907,85	90,785	0,059161
Sloupec 3	10	905,36	90,536	0,029827

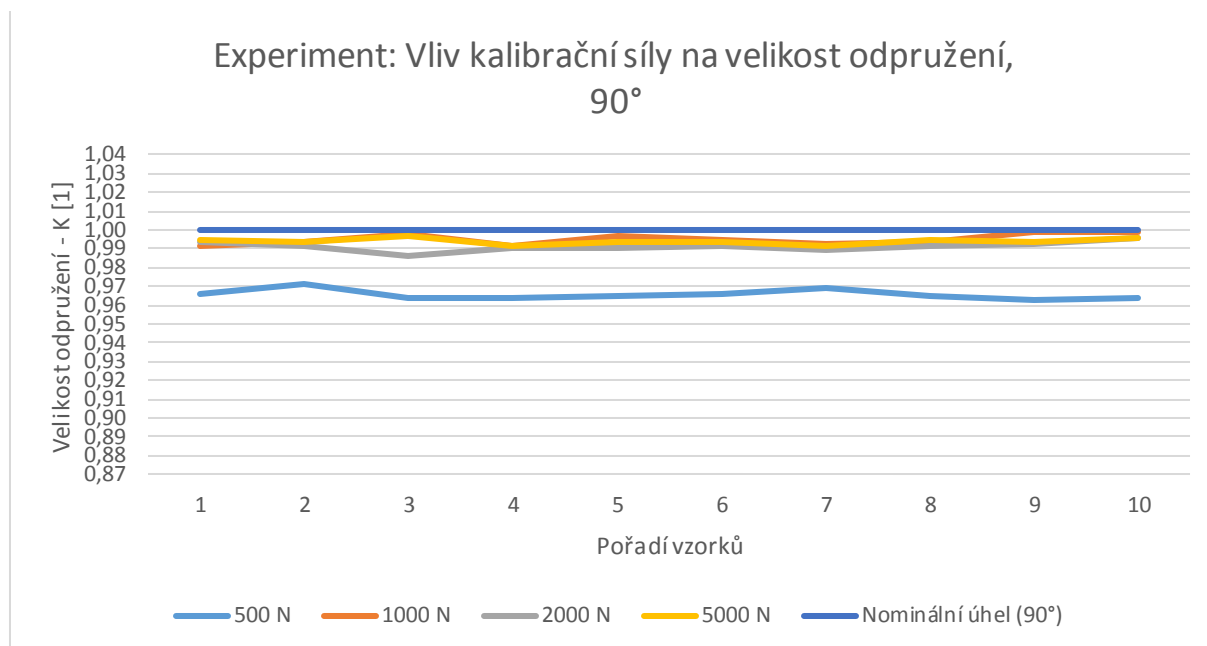
ANOVA

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	0,59982	2	0,29991	5,681509	0,00872145	3,354131
Všechny výběry	1,42525	27	0,052787			
Celkem	2,02507	29				



Obrázek 73: Rozsah velikosti odpružení při změně velikosti kalibrační síly skrze všechny testované vzorky, směr odebrání 0°

Zdroje: Vlastní



Obrázek 74: Rozsah velikosti odpružení při změně velikosti kalibrační síly skrze všechny testované vzorky, směr odebrání 90°

Zdroje: Vlastní

Ze Studentova testu vychází, že vliv odebrání materiálu nemá vliv na velikost odpružení. Z obou testů Anovy, že velikost kalibrační síly má vliv na velikost odpružení. Při detailnější testování v rozsahu od 1000N a 5000N vychází, že statisticky úhel odebrání 90° má vliv na velikost odpružení, ale úhel odebrání 0° vliv na velikost odpružení nemá. Z grafů (obr. 73,74) naměřených hodnot je patrné, že kalibrační síly od 1000N až po 5000N se blíží nominálnímu výsledku.

Z výsledku experimentu je zjevné, že postačí pouhých 1000N, abychom účinně eliminovali odpružení pomocí kalibrační síly při tloušťce plechu 0,6 mm. Získáme 99% požadovaného úhlu. Ze statistického výsledku je vhodnější použít materiál s odebráním 0° vůči směru vláken materiálu.

## 4. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo určit velikost odpružení dvoufázové oceli DP500. Dnes vzrůstá trend využití dvoufázových ocelí na tvorbu pevného skeletu pro posádku vozidla a různých výztuh s nároky na vysokou pevnost při deformaci. Tato vzrůstající poptávka s sebou nese i poptávku v oblasti výzkumu, zvláště v oblasti tváření. Tato bakalářská práce je zaměřena na technologii ohýbání oceli DP500, zejména na nežádoucí vliv odpružení po ohybu. Odpružení po ohybu se nesmírně obtížně určuje.

Série zkoušek byla zaměřena na míru velikosti odpružení po ohybu. Experiment se skládal ze dvou typů zkoušek, které jednak určovaly vliv poloměru zaoblení ohybníku na velikost, jednak vliv velikosti kalibrační síly na velikost odpružení. Velikost odpružení byla měřena pomocí 3D měření experimentálně získaných vzorků. Z naměřených hodnot byly následně vypočítány hodnoty odpružení.

Oba experimenty vyšly dle statistického výpočtu tak, že vliv odebrání materiálu nemá vliv na velikost odpružení, ale má vliv na velikost odpružení.

Z výsledků experimentu vlivu ohybníku na velikost odpružení je patrné, že nejvhodnějším rádiem na tloušťku materiálu 0,6 mm je rádius R2,2. Rádius R2,2 měl výsledky:  $\alpha_2$  (konečný úhel s odpružením) =  $89,16^\circ$  při  $0^\circ$  orientace osy ohybu vůči vláknům, velikost odpružení 1,0095;  $\alpha_2 = 89,08^\circ$  při  $90^\circ$  orientaci osy ohybu vůči vláknům, velikost odpružení 1,0104.

Experiment s použitím kalibrační síly byl mnohem více efektivnější a přesnější než volba experimentu s použitím odlišných poloměrů zaoblení R na zmírnění dopadu velikosti odpružení na požadovaný úhel  $90^\circ$ . Použití kalibrační síly je vhodnější pro hromadnou sériovou výrobu z důvodu jednoduchosti nastavení, nejedná se o zásah do nástroje. Při tloušťce plechu 0,6 mm a nominálním úhlu  $90^\circ$  lze získat odchylku od nominálního úhlu 1 % už při kalibrační síle 1000N. Kalibrační síly 2000N a 5000N jsou zbytečnými náklady na čas a energii.

Doporučení pro další výzkum: 1) nalézt vhodnější rádius ohybu v rozsahu od R2,2 do R4, který posléze lze použít pro hromadnou výrobu s úsporou času i energií

2) uskutečnit stejný výzkum pro odlišné tloušťky plechu s přihlédnutím na požadavky průmyslu.

Nejprůkaznějším výzkumem by bylo podrobit velikost odpružení DP500 sérii testů s vyhodnocením numerického výpočtu pomocí softwaru Yoshida-Uemori, jedná se ale o velice nákladný výzkum.

## 5. Přílohy

### STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

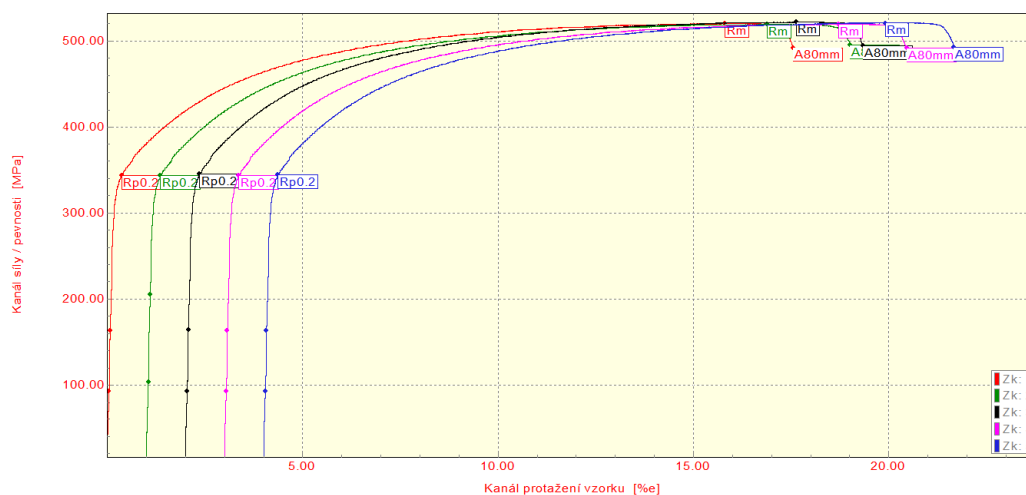
#### EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : DP 500  
 Norma :  
 Rozměry vzorku : [20 x 0,6] mm  
 Směr odebrání : 0°  
 Rychlost deformace : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval : Jakub Fibich

#### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	343.8	520.4	15.55	17.30
2	343.5	519.4	15.63	17.76
3	345.3	522.2	15.35	17.09
4	343.5	519.9	15.45	17.19
5	344.2	521.2	15.64	17.41

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	344.1	520.6	15.52	17.35
Směrodatná odchylka	0.7	1.1	0.12	0.26
Minimální hodnota	343.5	519.4	15.35	17.09
Maximální hodnota	345.3	522.2	15.64	17.76





## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

### EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : DP 500

Norma :

Rozměry vzorku : [20 x 0,6] mm

Směr odebrání : 45°

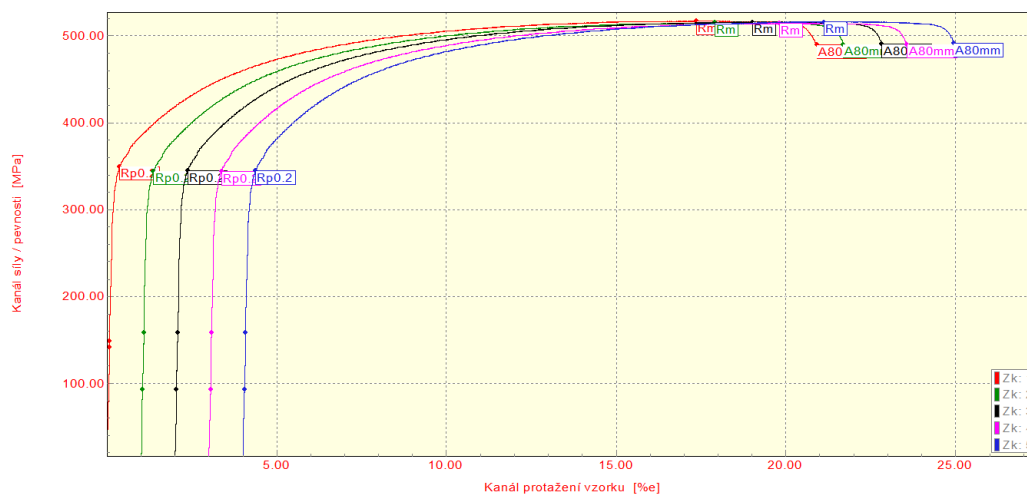
Rychlost deformace : proměnná 1(15) mm/min.

Vypracoval : Jakub Fibich

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	349.7	517.3	17.10	20.66
2	344.2	515.1	16.65	20.45
3	344.7	515.9	16.75	20.58
4	343.8	514.6	16.54	20.32
5	344.9	516.2	16.86	20.71

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	345.5	515.8	16.78	20.54
Směrodatná odchylka	2.4	1.0	0.21	0.16
Minimální hodnota	343.8	514.6	16.54	20.32
Maximální hodnota	349.7	517.3	17.10	20.71



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

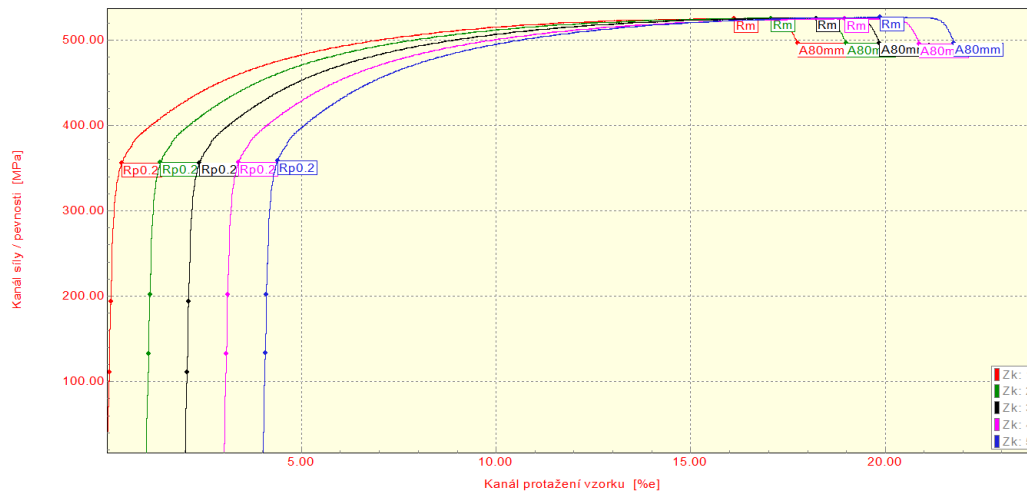
## EN ISO 6892-1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : DP 500  
 Norma :  
 Rozměry vzorku : [20 x 0,6] mm  
 Směr odebrání : 90°  
 Rychlost deformace : proměnná 1(15) mm/min.  
 Vypracoval : Jakub Fibich

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	355.8	525.3	15.86	17.50
2	357.1	525.7	15.80	17.74
3	356.2	526.0	15.96	17.61
4	356.9	525.2	15.71	17.63
5	358.2	527.0	15.61	17.52

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	356.8	525.9	15.79	17.60
Směrodatná odchylka	0.9	0.7	0.14	0.10
Minimální hodnota	355.8	525.2	15.61	17.50
Maximální hodnota	358.2	527.0	15.96	17.74



## 6. Seznam použité literatury:

1. GIRMAN, Vladimír. Kovové materiály automobilových konstrukcí - II Karoséria a karosářenské plechy [online]. Peter Oslanec – ENTOS. 02/08/2012 - 18:02 [cit. 2016-12-11]. ISSN 1337- 8953. Dostupné z: [http://www.materialing.com/materialy\\_auto\\_konstrukcii](http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii)
2. MACHÁČOVÁ, Dana a Pavel MACHÁČ. Stavba karoserií a skříní [online]. VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE. 01.01.2007 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: [http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27\\_Stavba\\_karoserii\\_a\\_skrini.pdf](http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U27_Stavba_karoserii_a_skrini.pdf)
3. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 3: speciální kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05685-1.
4. JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
5. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
6. HERDITZY, Attila, Mária KICKOVÁ a Mariana OLEXOVÁ. Moderne koncipované ocele použité pri výrobe automobilovej karosérie [online]. Technická univerzita v Košiciach Strojnícka fakulta Katedra technológií a materiálov. 12/2008 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/12-2008/pdf/106-109.pdf>
7. Trendy ve vývoji plechů pro automobilový průmysl [online]. Technická univerzita v Liberci. [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf)
8. PACHOLKOVÁ, Šárka, PEŠA, Jindřich. Možnosti výroby dvoufázových feriticko-martenzitických ocelí v NH, a.s. [online]. VZÚ, NOVÁ HUŤ, a.s., Vratimovská 689, 707 02 Ostrava, ČR. [cit. 2017-1-9]. Dostupné z: [http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/metal\\_00/papers/241.pdf](http://metal2012.tanger.cz/files/proceedings/metal_00/papers/241.pdf)
9. XIE, S.T, Z.Y. LIU, Z. WANG, G.D. WANG. Microstructure and mechanical properties of a Ti-microalloyed low-carbon stainless steel treated by quenching-partitioning-tempering proces [online]. Elsevier B.V., 2016, 55-64, [cit. 19.1.2017]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580316300833>
10. Properties of Dual Phase (DP) Steel [online]. AZoNetwork, [cit. 24.1.2017]. Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11245>
11. KŘÍŽAN, Daniel. Nová ocel – ľahšie a bezpečnejšie autá. VEDA NA DOSAH [online]. Bratislava: Centrum vedecko-technických informácií SR, 13.7.2015, [cit. 2017-3-12]. Dostupné z: <http://vedanadosah.cvtisr.sk/nova-ocel-lahsie-a-bezpecnejsieauta>
12. FOREJTOVÁ, Lucie a jiné. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, s. r. o., 2017, [cit. 2017-3-12].

Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>

13. ČADA, Radek. *Technologie I* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008 [cit. 2017-02-19]. ISBN 978-80-248-1507-7.

14. KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, c1998. ISBN 80-7183-054-2.

15. FISCHER, Ulrich a kol. *Základy strojírenství. 2.* Haan-Gruiten, Germany: Verlag Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, 2014. ISBN 978-3-8085-1193-0

16. LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5.

17. MACHEK, Václav. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04683-8.

18. DVOŘÁK, Roman a jiné. *Akademie tváření: Odpružení v plošném tváření*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, s. r. o., 2017, [cit. 2017-3-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html>

19. ABBAS, Ghaei., *Modeling Springback in Stamped Automotive Structures*. Windsor, Ontario, Canada 2010. Electronic Theses and Dissertations. University of Windsor. Paper 188.

Dostupné z:

<http://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1187&context=etdd>

20. PAVELEK, Michal. *Návrh postupu výroby součástí pro váleček pásového dopravníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 85 s. 10 výkresů. 28 příloh. CD. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Karel Novotný, CSc.

21. DYMÁČEK, Martin *Možnosti odstranění zbytkových napětí v tenkých pásech pomocí tahového rovnání: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2010. 72 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

22. SODOMKA, Lubomír. *Pevnost materiálu* [online]. Liberec: DML-CZ: The Czech Digital Mathematic Library, 1972. [cit. 2017-2-28]. Dostupné z: [http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139530/PokrokyMFA\\_17-1972-6\\_6.pdf](http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139530/PokrokyMFA_17-1972-6_6.pdf)

23. SERKAN, TOROS. *Parameters Determination of Yoshida Uemori Model Through Optimization Process of Cyclic Tension-Compression Test and V-Bending Springback*. Scielo [online]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2016, [cit. 2017-2-28]. ISSN 1679-7825.

Dostupné z:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1679-782520160010018933](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-782520160010018933)